

Simulação e Otimização

Capítulo 3: Simulação

Raquel Bernardino

rbernardino@iseg.ulisboa.pt

Gabinete 511 Quelhas 6

Introdução

Diagramas de ciclo de atividades

Implementação de um modelo de simulação

Controlo da simulação

Modelação de várias características do sistema

Introdução

Diagramas de ciclo de atividades

Implementação de um modelo de simulação

Controlo da simulação

Modelação de várias características do sistema

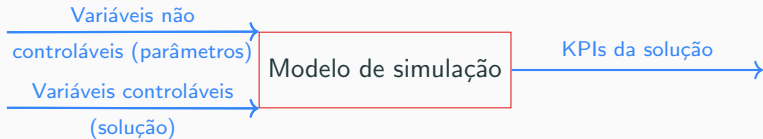
- A **simulação** consiste em replicar um sistema com vários cenários de forma a recolher dados sobre o seu funcionamento.
- A utilização da simulação torna-se indispensável quando o sistema em estudo é estocástico ou demasiado complexo para ser analisado (de forma satisfatória) por outros modelos matemáticos.
- Exemplos onde a simulação é particularmente útil:
 - ▶ Gestão de stocks estocásticos,
 - ▶ Filas de espera, e
 - ▶ Desenvolvimento de processos produtivos.

Introdução

■ Um modelo de simulação:

- ▶ Reproduz uma sequência de estados do sistema que evoluem ao longo do tempo.
- ▶ Regista indicadores de performance (*key performance indicators* - KPIs) para avaliar a solução obtida.

■ Mudança de paradigma:



O modelo de simulação recebe dois tipos de variáveis: não controláveis (parâmetros) e controláveis (solução), e devolve os KPIs da solução.

- Devemos usar modelos de simulação quando:
 - ▶ Não é possível usar um modelo analítico para descrever o sistema.
 - ▶ É difícil obter uma solução através de métodos analíticos.
 - ▶ Queremos experimentar novas soluções (já conhecidas) antes da sua implementação.
 - ▶ Queremos estudar as interações entre as variáveis do sistema.
 - ▶ Queremos melhorar o sistema através dos resultados obtidos através do modelo de simulação.
- É frequente combinar otimização com simulação. $\implies$ O modelo de otimização produz soluções que são avaliadas através do modelo de simulação.

- Um sistema de simulação pode ser discreto ou contínuo.
 - ▶ **Discreto:** As alterações do estado do sistema devem-se a acontecimentos que acontecem em instantes discretos do tempo.
 - ▶ **Contínuo:** As alterações do estado do sistema mudam continuamente ao longo do tempo. $\implies$ Envolve cálculos diferenciais estocásticos e, por isso, é aproximado discretizando o tempo.
- **Simulação de eventos discretos:**
 - ▶ Sistemas de simulação abertos, onde os inputs influenciam os outputs mas os outputs não têm influência nos inputs.
 - ▶ Há interação de fora para dentro do sistema.

Introdução

Diagramas de ciclo de atividades

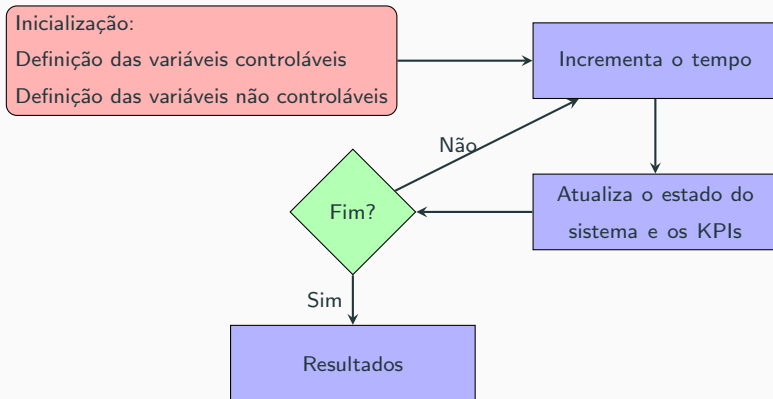
Implementação de um modelo de simulação

Controlo da simulação

Modelação de várias características do sistema

Simulação de eventos discretos

- Um sistema de simulação de eventos discretos pode ser formulado da seguinte forma:



Exemplo: Funcionamento de uma farmácia

Considere-se uma farmácia com um balcão de atendimento. Sabemos que chega uma pessoa de 10 em 10 minutos e que os tempos de atendimento dos primeiros cinco clientes são os representados na tabela seguinte:

Cliente	1	2	3	4	5	...
Tempo atendimento (min.)	22	8	2	5	10	...

Exemplo

■ Vamos executar a simulação:

Relógio (min.)	Evento	N.º clientes sistema	Instante próxima chegada	Instante próxima partida	Próximo evento
0	Chegada C1 C1 inicia serviço	1	10	22	Chegada C2
10	Chegada C2	2	20	22	Chegada C3
20	Chegada C3	3	30	22	Saída C1
22	Saída C1 C2 inicia serviço	2	30	30	Chegada C4 Saída C2
30	Saída C2 C3 inicia serviço Chegada C4	2	40	32	Saída C2 C3
32	Saída C3 C4 inicia serviço	1	40	37	Saída C4
37	Saída C4	0	40	-	Chegada C5
...					

- Os sistemas que representam processos reais não são estáticos.
 - ▶ Não chega uma pessoa à farmácia a cada 10 minutos.
- A aleatoriedade é representada por **sequências de números aleatórios**.
 - ▶ Uma sequência de números aleatórios com distribuição F é uma sequência de valores que possam ser resultados da realização de experiências aleatórias independentes com distribuição de probabilidade F .
- Computacionalmente não conseguimos gerar uma sequência de números aleatórios. $\Rightarrow$ Números pseudo-aleatórios (NPAs).
 - ▶ NPAs são obtidos por funções matemáticas que tentam replicar o comportamento de sequências de números aleatórios.
 - Sabendo o primeiro NPA - **semente** - conseguimos saber qual é a sequência gerada.

Simulação de eventos discretos: componentes do sistema

■ **Entidades:** elementos básicos do sistema.

- ▶ **Permanentes:** estão sempre presentes no sistema (recursos do sistema).
- ▶ **Temporárias:** entram e saem do sistema durante o período de simulação.

As entidades podem ter **atributos** para registrar as suas propriedades.

■ **Filas:** grupos de entidades que partilham condições. Podem representar filas físicas ou conceptuais.

A **política da fila** define a entrada e saída de pessoas da fila.

■ **Evento:** uma ocorrência que muda o estado de uma ou mais entidades do sistema.

■ **Atividade:** uma operação que muda o estado do sistema.

- ▶ Requerem a cooperação de várias entidades.
- ▶ Demoram tempo a serem executadas - duração da atividade.
- ▶ As mudanças do estado do sistema resultantes de uma atividade ocorrem no início ou no fim da atividade.

Os **eventos** representam o **início e o fim** de atividades.

Para representar um modelo de simulação vamos usar **diagramas de ciclo de atividades**.

O diagrama de ciclo de atividades utiliza três componentes:

- ▶ Entidades,
- ▶ Filas,
- ▶ Atividades.

Os diagramas de ciclo de atividades resultam da agregação dos **diagramas de ciclo de vida** de cada entidade.

O **ciclo de vida** descreve o processo de cada entidade através de uma sequência de estados ativos e estados passivos.

- ▶ **Estado ativo:** quando uma entidade está envolvida em alguma atividade.
- ▶ **Estado passivo:** quando uma entidade está à espera para começar uma nova atividade.

O ciclo de vida de uma entidade é uma sequência que alterna entre estados ativos e estados passivos.

Para representar um diagrama de ciclo de vida usamos:

- ▶ Retângulos para representar atividades - estados ativos.
- ▶ Círculos para representar filas - estados passivos.

O diagrama de ciclo de atividades do sistema é obtido agregando os diagramas de ciclo de vida das entidades que compõem o sistema através das atividades em comum.

Exemplo: Bomba de combustível

O clientes chegam a uma bomba de combustível de acordo com uma Poisson com uma média de cinco clientes a cada meia-hora. A bomba tem quatro locais de abastecimento disponíveis. O tempo de abastecimento é modelado por uma Normal de valor médio quatro minutos e desvio-padrão dois minutos. Após o abastecimento, os clientes devem pagar, o que é feito numa caixa física. O tempo de pagamento é modelado por uma Uniforme(2, 4). Antes de saírem da bomba os clientes costumam lavar o seu carro, uma vez que esta bomba de combustível é conhecida pelos seu excelente serviço de lavagem a preços baixos. Existe apenas um sistema de lavagem e o tempo de lavagem é modelado por uma Uniforme(8, 12). Comece por identificar as entidades, atividades e filas do sistema. De seguida, construa o diagrama de ciclo de vida para cada atividade e por fim o diagrama de ciclo de entidade do sistema.

Exemplo (continuação)

■ Entidades:

- ▶ Bombas de combustível (entidade permanente)
- ▶ Caixa de pagamento (entidade permanente)
- ▶ Sistema de lavagem (entidade permanente)
- ▶ Cliente (entidade temporária)

■ Atividades:

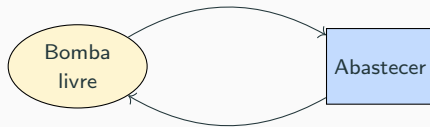
- ▶ Abastecer
- ▶ Pagar
- ▶ Lavar o carro
- ▶ Chegada (atividade fictícia)

■ Filas:

- ▶ Espera abastecer → Bomba livre
- ▶ Espera pagar → Caixa livre
- ▶ Espera lavagem → Sistema livre
- ▶ Exterior (fila fictícia)

Exemplo (continuação)

- Diagrama de ciclo de vida da bomba de combustível:



- Diagrama de ciclo de vida da caixa de pagamento:

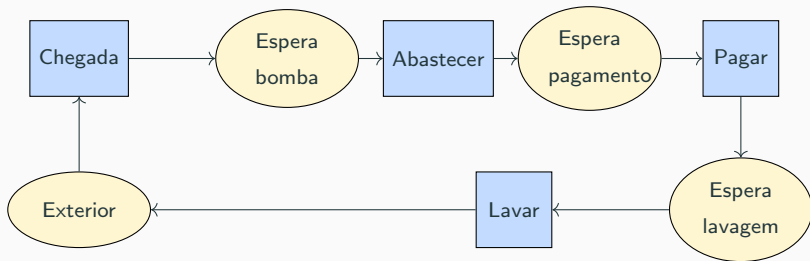


- Diagrama de ciclo de vida do sistema de lavagem:



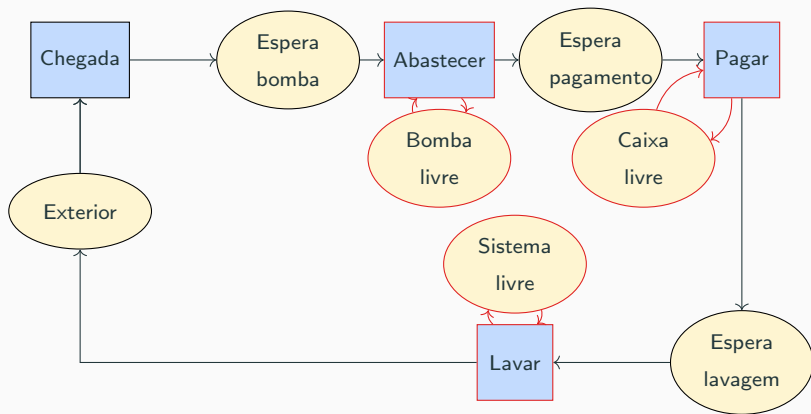
Exemplo (continuação)

■ Diagrama de ciclo de vida do cliente:



Exemplo (continuação)

■ Diagrama de ciclo de atividades:



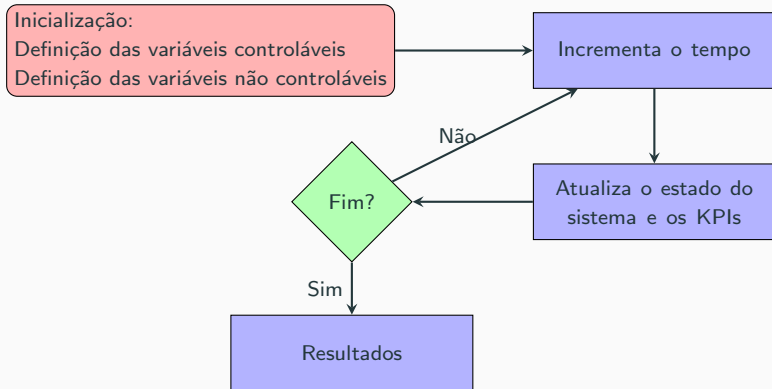
Nota: Para extrair informação do sistema através dos indicadores de performance temos que o implementar.

- ▶ São uma forma clara, simples e estandardizada de representar o sistema.
- ▶ É uma ferramenta de diálogo entre os vários agentes de decisão.
- ▶ Facilita as tarefas subsequentes, nomeadamente a implementação do modelo de simulação.

Implementação de um modelo de simulação

■ Como podemos implementar um modelo de simulação?

- ▶ Utilizando uma linguagem de programação e o fluxograma:



- ▶ Utilizando softwares específicos de simulação (Simul8, Arena ou bibliotecas como a SimPy do Python).
 - Vamos utilizar o **Simul8** para implementar os modelos de simulação.

Introdução

Diagramas de ciclo de atividades

Implementação de um modelo de simulação

Controlo da simulação

Modelação de várias características do sistema

■ Estruturas básicas

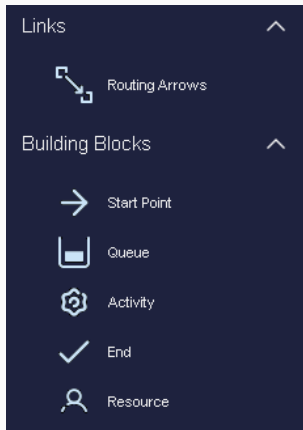


Figura 1: Estruturas básicas de um modelo de simulação no Simul8.

- ▶ **Ponto de partida:** Modela a chegada das entidades temporárias ao sistema.
 - Cada entidade temporária tem um ponto de partida.
- ▶ **Fila de espera:** Modela o tempo de espera por uma atividade (estados passivos do diagrama de ciclo de vida).
- ▶ **Atividade:** Modela a execução de uma atividade (estados ativos do diagrama de ciclo de vida).
- ▶ **Fim:** Modela a saída das entidades temporárias do sistema.
- ▶ **Recurso:** Modela o que é gasto/ocupado durante a execução de uma atividade.
- ▶ **Setas de roteamento:** Modelam o percurso das entidades temporárias no sistema.

Exemplo

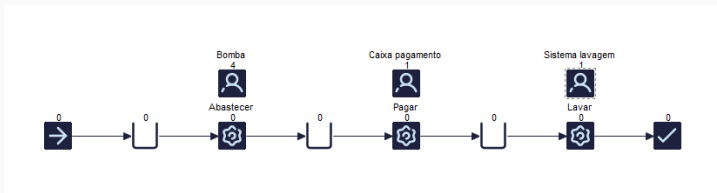


Figura 2: Sistema da bomba de combustível no Simul8.

- No exemplo da bomba de combustível no Simul8 temos:
 - ▶ Um ponto de entrada e saída do sistema, que representam a entrada e saída de carros da bomba de combustível;
 - ▶ Três filas de espera associadas aos carros: espera abastecer, pagar e lavar;
 - ▶ Três atividades: abastecer, pagar e lavar; e
 - ▶ Três tipos de recursos que são ocupados na execução das atividades: bombas de combustíveis, caixa pagamento e sistema de lavagem.
 - Existem quatro réplicas do recurso bomba de combustível.

■ Propriedades dos pontos de entrada

Figura 3: Propriedades dos pontos de entrada no Simul8.

Podemos:

- ▶ Alterar o nome (na figura alterado para Chegada).
- ▶ Definir o tempo entre chegadas consecutivas.
- ▶ Definir a distribuição de probabilidade com que as chegadas são geradas.
 - É possível fixar o tempo entre chegadas consecutivas.
- ▶ Alterar o ícone que representa o ponto de chegada.

■ Os sub-menus *Batching* e *Routing Out* serão analisados nos próximos slides.

■ Propriedades dos pontos de entrada: *Batching* e *Routing Out*

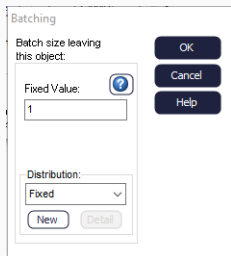


Figura 4: Propriedades *Batching*.



Figura 5: Propriedades *Routing Out*.

■ Relativamente ao *Batching*, é possível:

- ▶ Definir que as entidades chegam em grupos (*batch*) de um determinado tamanho.

■ Relativamente ao *Routing Out*, é possível:

- ▶ Quando existem vários arcos a sair do ponto e entrada definir qual o arco de saída prioritário (*Priority*) ou qual a probabilidade de escolher cada um dos arcos (*Percent*).

■ Propriedades das filas de espera

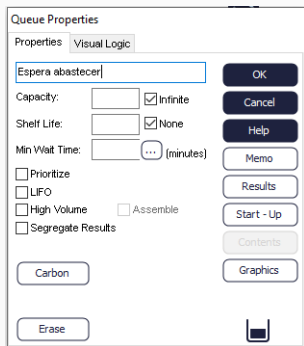


Figura 6: Propriedades das filas de espera no Simul8.

Podemos:

- ▶ Alterar o nome;
- ▶ Definir um tamanho máximo para a fila de espera (na figura é *Infinite*);
- ▶ Definir um tempo máximo (*Shelf Life*) e um tempo mínimo (*Min Wait Time*) para estar na fila de espera;
- ▶ Escolher várias políticas de fila (por omissão é FIFO); e
- ▶ Definir o número de indivíduos na fila de espera quando a simulação começa (*Start-Up* mostrado na Figura 7).

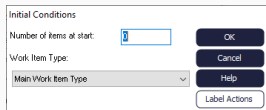


Figura 7: Propriedades *Start-Up*.

■ Propriedades das atividades

Podemos:

- ▶ Alterar o nome da atividade;
- ▶ Definir a duração média da atividade.
- ▶ Definir a distribuição de probabilidade da duração da atividade.
 - É possível fixar a duração de uma atividade.
- ▶ Alterar o ícone que representa o ponto de chegada.

Figura 8: Propriedades das atividades no Simul8.

■ Propriedades das atividades: *Resources* e *Replicate*

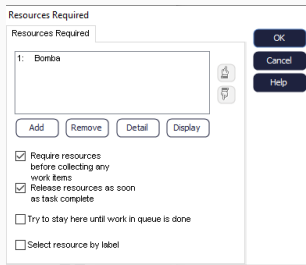


Figura 9: Propriedades *Resources*.



Figura 10: Propriedades *Replicate*.

■ Nos *Resources* é indicado que recursos são gastos/ocupados para realizar a atividade. → No próximo slide veremos como são criados.

■ No *Replicate* é indicado o número de atividades que podem ser realizadas em paralelo.

► Como quando criamos os recursos indicamos o número de recursos existentes, podemos definir o número de réplicas como infinito.

■ Propriedades do fim

End Properties

Saída

Carbon

Erase

✓

✓ Halt Simulation at Limit: 10000

Segregate Results

High Volume

File

Remove from all states

OK

Cancel

Help

Memo

Results

Graphics

Podemos parar a simulação quando um certo número de tarefas foi realizado (*Halt Simulation at Limit*).

Figura 11: Propriedades do fim Simul8.

■ Propriedades dos recursos

Resource Properties

Properties Visual Logic

Bomba

Number of this type of resource available: 4

or

☐ Shift Dependent

Shifts

Carbon

Erase

OK

Cancel

Help

Memo

Results

Travel

Graphics

Find

Availability

Priority Matrix

Podemos definir o número de recursos disponíveis assim como definir o número de recursos dependentes do turno.

existentes dependendo

Figura 12: Propriedades dos recursos no Simul8.

■ Propriedades do relógio



Figura 13: Relógio no Simul8.

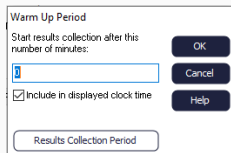
No relógio mostra o decorrer do tempo na simulação. Nas suas propriedades podemos:

- ▶ Definir a unidade de tempo.
- ▶ Definir a forma como o tempo é apresentado assim como o formato do relógio.
- ▶ Definir quantos dias tem uma semana e quais são.
- ▶ Definir a que horas cada dia começa e qual é a duração do dia.



Figura 14: Propriedades do relógio no Simul8.

■ Propriedades do relógio: *Warm Up Period* e *Results Collection Period*



Warm Up Period

Start results collection after this number of minutes:

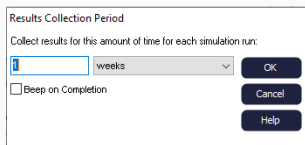
☒ Include in displayed clock time

Results Collection Period

OK Cancel Help

Figura 15: Propriedades *Warm Up Period*.

■ No *Warm Up Period* é indicado a partir de que unidade de tempo é que os resultados começam a ser recolhidos (disponível na janela *Additional*).



Results Collection Period

Collect results for this amount of time for each simulation run:

weeks

☐ Beep on Completion

OK Cancel Help

Figura 16: Propriedades *Results Collection Period*.

■ No *Results Collection Period* é indicado o período de tempo durante o qual devemos recolher dados da simulação.

Exemplo: Bomba de combustível

O clientes chegam a uma bomba de combustível de acordo com uma Poisson com uma média de cinco clientes a cada meia-hora. A bomba tem quatro locais de abastecimento disponíveis. O tempo de abastecimento é modelado por uma Normal de valor médio quatro minutos e desvio-padrão dois minutos. Após o abastecimento, os clientes devem pagar, o que é feito numa caixa física. O tempo de pagamento é modelado por uma Uniforme(2, 4). Antes de saírem da bomba os clientes costumam lavar o seu carro, uma vez que esta bomba de combustível é conhecida pelos seu excelente serviço de lavagem a preços baixos. Existe apenas um sistema de lavagem e o tempo de lavagem é modelado por uma Uniforme(8, 12). Determine:

1. O tempo médio de um carro no sistema.
2. A taxa de ocupação da lavagem.

Exemplo (continuação)

- Vamos começar por considerar o caso determinístico. Para isso assumimos que:
 - ▶ Chegam 10 clientes por hora. $\implies$ Tempo entre chegadas 6 minutos.
 - ▶ O tempo de abastecimento é 4 minutos.
 - ▶ O tempo de pagamento é 3 minutos.
 - ▶ O tempo de lavagem é 10 minutos.
- Período de simulação: 1 dia (das 9:00 às 17:00).

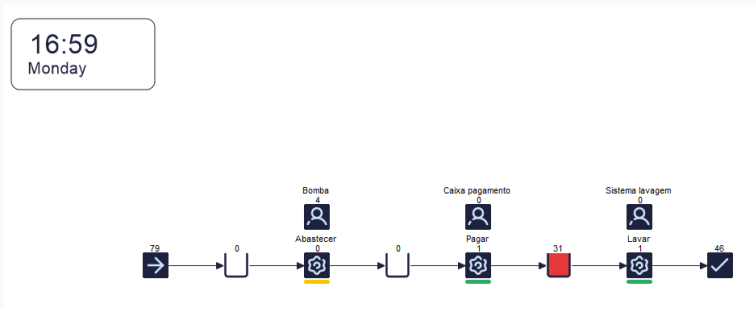
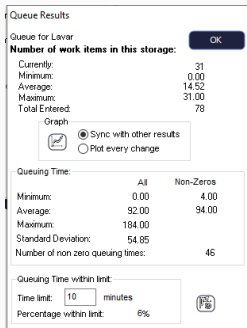
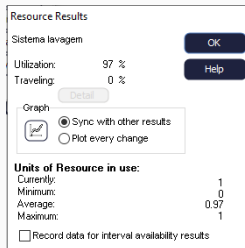


Figura 17: Estado do sistema no fim do dia simulado.

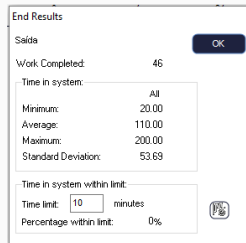
Exemplo (continuação)



(a) Resultados fila de espera lavagem.



(b) Resultados recurso sistema lavagem.



(c) Resultados fim do sistema.

Figura 18: Resultados de várias estruturas no Simul8.

O tempo médio de um carro no sistema é de 110 minutos e taxa média de ocupação do sistema de lavagem é 97%.

- ▶ Como as distribuições são fixas obtemos sempre os mesmos resultados. $\Rightarrow$ Caso estocástico.

Exemplo (continuação)

- Vamos agora considerar o caso estocástico, com as distribuições de probabilidades indicadas no enunciado.
- Período de simulação: 1 dia (das 9:00 às 17:00).

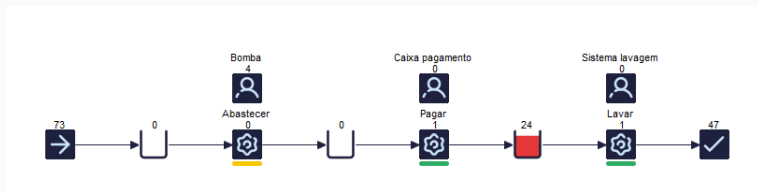


Figura 19: Estado do sistema no fim do dia simulado com estocasticidade.

Das 73 pessoas que entraram no sistema, saíram 47, 24 estão na fila para lavar, 1 está a pagar e 1 está a lavar.

O tempo médio de um carro no sistema é de 100.04 minutos e taxa de ocupação do sistema de lavagem é 97%.

- ▶ Apesar de utilizarmos distribuições para gerar os NPAs obtemos sempre os mesmos resultados.

Introdução

Diagramas de ciclo de atividades

Implementação de um modelo de simulação

Controlo da simulação

Modelação de várias características do sistema

- Os NPAs gerados no Simul8 são sempre os mesmos.
 - ▶ O Simul8 usa sempre a mesma semente para realizar as simulações.
⇒ A semente pode ser alterada.
- Ao simularmos o funcionamento do sistema apenas uma vez não obtemos resultados fidedignos sobre o seu funcionamento.
 - ▶ Os NPAs gerados podem fazer com que subestimemos ou sobrestimemos a performance real do sistema.
- As condições de início da simulação devem ser idênticas às condições iniciais do sistema que pretende replicar.
 - ▶ Por exemplo, quando queremos simular sistemas que estão sempre a funcionar (por exemplo, fábricas ou hospitais) não queremos que o sistema comece vazio.

Controlar a simulação

■ Devemos fazer várias corridas com sementes diferentes. Desta forma, garantimos que a nossa amostra de resultados das simulações tem variabilidade e assemelha-se à realidade.

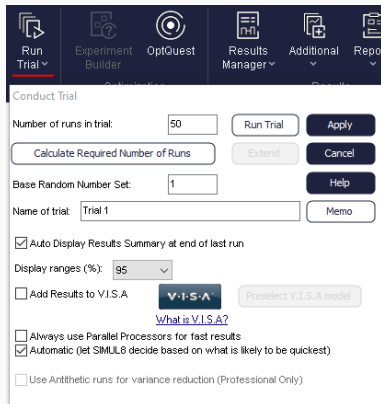


Figura 20: Menu para fazer várias corridas.

Podemos:

- ▶ Definir o número de corridas do *trial*.
 - Quanto maior a amostra melhor - 30 corridas é uma grande amostra.
- ▶ Calcular o número de corridas necessárias para garantir que temos convergência.
- ▶ Definir a semente do *trial*.
- ▶ Escolher o grau de significância dos intervalos de confiança apresentados nos resultados.

Exemplo

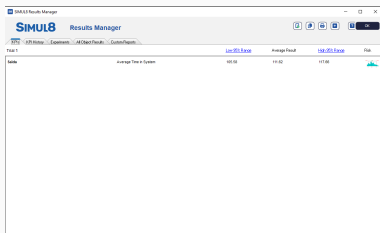


Figura 21: Resultados do *Trial 1*.

■ Podemos consultar mais resultados acrescentando componentes do modelo de simulação ao visualizador de resultados.

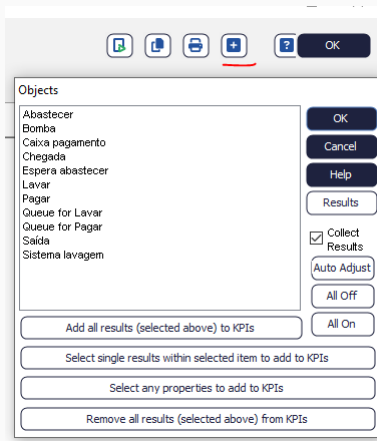


Figura 22: Objetos a adicionar ao visualizador de resultados.

Exemplo (continuação)

- Adicionando os resultados associados à fila de espera da bomba, do recurso bomba e do início obtemos:

SIMUL8 Results Manager

Results Manager

OK

KPIs

KPI History

Experiments

All Object Results

Custon Reports

Trial 1

Low 95% Bound

Average Result

High 95% Bound

Pick

Bomba

Utilization %

16.60

17.11

17.61



Minimum Use

0.00

0.00

0.00

Current Use

0.39

0.58

0.77



Average Use

0.66

0.68

0.70



Maximum Use

3.71

3.82

3.93



Traveling %

0.00

0.00

0.00

Chegada

Number Entered

70.81

81.34

83.87



Number Lost

0.00

0.00

0.00

Net Number Entered

70.81

81.34

83.87



Espera abastecer

Minimum Queue Size

0.00

0.00

0.00

Average Queue Size

0.00

0.00

0.00



Maximum Queue Size

0.99

1.06

1.13



Minimum Queuing Time

0.00

0.00

0.00

Minimum (Non-zero) Queuing Time

0.00

0.21

0.34



Average Queuing Time

0.00

0.01

0.01



Average (Non-zero) Queuing Time

0.12

0.27

0.41



Maximum Queuing Time

0.15

0.33

0.51



Number of Non-zero Queuing Times

0.27

0.54

0.81



% Queued Less Than Time Limit

100.00

100.00

100.00

"Queued Less Than" Time

10.00

10.00

10.00

St Dev of Queuing Time

-0.00

0.01

0.02



Current Contents

0.00

0.00

0.00

Items Entered

70.81

81.34

83.87



Figura 23: Resultados *Trial 1*.

Controlar a simulação

- Quando o sistema começa vazio as filas encontram-se vazias. Assim, o tamanho das filas de espera é tendencialmente mais baixo no início da simulação do que no fim.
- Podemos considerar um período durante o qual o sistema ainda não convergiu e, por isso, não são recolhidos dados durante esse período - o **período de aquecimento**.
- Para determinar o tamanho do período de aquecimento, podemos simular o funcionamento do sistema durante um grande período de tempo e ver a partir de que instante é que os resultados estabilizam (*steady-state*).

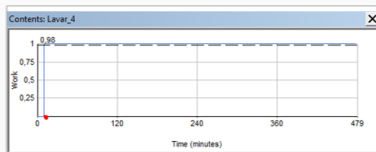


Figura 24: Taxa de ocupação da lavagem ao longo da simulação.

- ▶ A partir do ponto vermelho a taxa de ocupação do sistema de lavagem é sempre a mesma. $\Rightarrow$ O sistema estabilizou.
- Também é possível apenas recolher resultados durante um determinado período do dia (*Results Collection Period*).

Introdução

Diagramas de ciclo de atividades

Implementação de um modelo de simulação

Controlo da simulação

Modelação de várias características do sistema

Modelação de várias características do sistema

■ Exemplos de características do sistema que podemos modelar com o Simul8 são:

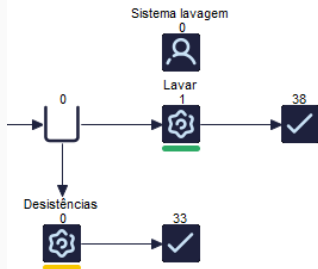
- ▶ Abandonos prematuros do sistema;
 - Desistências após um certo tempo à espera.
 - Limite do tamanho máximo da fila.
- ▶ Existência de caminhos alternativos;
- ▶ Gestão de recursos;
 - Partilha de recursos por várias atividades.
 - Necessidade de múltiplos recursos para executar uma atividade.
- ▶ Etiquetas;
 - Numéricas.
 - Alfabéticas.
- ▶ Turnos; e
- ▶ Interrupções.

■ Não vamos ver exemplos relativos aos turnos e às interrupções.

Exemplo: Abandonos prematuros do sistema - desistências

Exemplo: Bomba de combustível

Considere que os clientes que estão à espera há mais do que cinco minutos para a lavagem desistem. Determine, em média, qual é a percentagem de clientes que desiste da lavagem.



É criada uma nova atividade fictícia, com tempo nulo, para modelar as desistências. Também foi criado um novo objeto de fim para ser mais fácil determinar quantos clientes desistiram da lavagem.

Observando a figura, 33 clientes desistiram da lavagem.

Figura 25: Modelação de desistências no Simul8.

Exemplo: Abandonos prematuros do sistema - desistências

Queue Properties

Properties Visual Logic

Queue for Lavar

Capacity: ☒ Infinite

Shelf Life: 5 ☐ None

Min Wait Time: ... (minutes)

☐ Prioritize

☐ LIFO

☐ High Volume ☐ Assemble

☐ Segregate Results

Carbon

Erase

OK Cancel Help Memo Results Start - Up Contents Graphics

Figura 26: Modelação das desistências na fila de espera.

- ▶ O *Shelf Life* indica o tempo máximo que o cliente está na fila.

Routing In To: Desistências

Selection Method Options Change Over

Add Remove Pick From

1: Queue for Lavar

Discipline

☐ Priority

☐ Collect

☐ Passive

☒ Expired Only

☐ Oldest

☐ Youngest

☐ Longest

☐ Circulate

☐ Locked

☐ Cycle Matrix

☐ Uniform

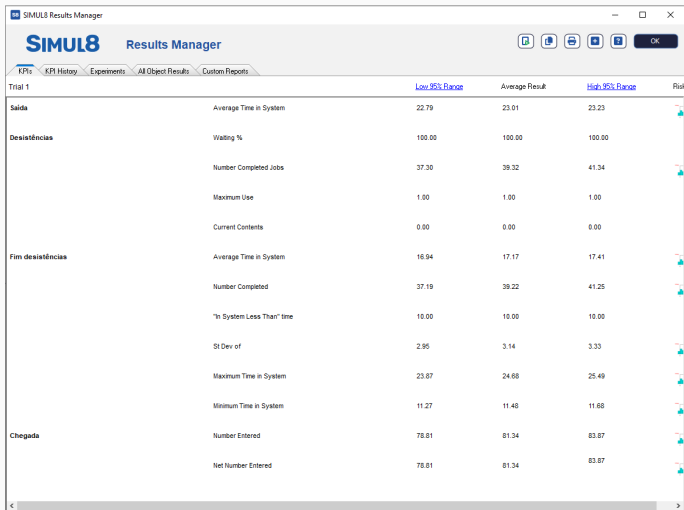
☐ Percentage

OK Close Help

Figura 27: Parametrização do *Routing In* para que só vão desistências para a atividade Desistências.

- ▶ Definir que a entrar (*Routing In*) na atividade Desistências só temos os que desistiram da fila (*Expired Only*).

Exemplo: Abandonos prematuros do sistema - desistências



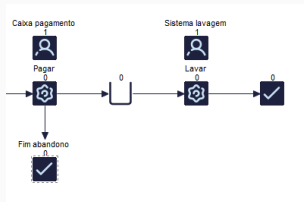
Trial 1		Low 95% Range	Average Result	High 95% Range	Risk
Saída	Average Time in System	22.79	23.01	23.23	
Desistências	Waiting %	100.00	100.00	100.00	
	Number Completed Jobs	37.30	39.32	41.34	
	Maximum Use	1.00	1.00	1.00	
	Current Contents	0.00	0.00	0.00	
Fim desistências	Average Time in System	16.94	17.17	17.41	
	Number Completed	37.19	39.22	41.25	
	"In System Less Than" time	10.00	10.00	10.00	
	St Dev of	2.95	3.14	3.33	
	Maximum Time in System	23.87	24.68	25.49	
	Minimum Time in System	11.27	11.48	11.68	
Chegada	Number Entered	78.81	81.34	83.87	
	Net Number Entered	78.81	81.34	83.87	

Figura 28: Resultados do *trial*.

Dos 81.34 clientes (em média) que entraram na bomba de combustível, 39.22 (em média) desistiram. Logo, a percentagem média de desistências é 48.22%.

Exemplo: Bomba de combustível

Considere que apenas existe espaço para três carros estarem à espera da lavagem. Quando os três espaços estão ocupados, os clientes abandonam a bomba sem lavarem o carro. Determine, em média, quantos carros abandonam a bomba de combustível sem lavarem o carro.



Para modelar os abandonos no sistema devido ao limite da capacidade da fila criamos o Fim Abandono.

Figura 29: Modelação dos abandonos.

Exemplo: Abandonos prematuros do sistema - limite tamanho da fila de espera

Queue Properties

Properties Visual Logic

Queue for Lavar

Capacity: 3 ☐ Infinite

Shelf Life: ☐ ☒ None

Min Wait Time: (minutes)

☐ Prioritize

☐ LIFO

☐ High Volume ☐ Assemble

☐ Segregate Results

Carbon

Erase

OK Cancel Help Memo Results Start-Up Contents Graphics

Figura 30: Modelação dos abandonos na fila de espera.

- ▶ Nas propriedades da fila de espera devemos atribuir o valor 3 à capacidade da fila (*Capacity*).

Em média, 42 pessoas abandonaram a bomba sem lavar o carro.

Routing Out From:

Discipline

☒ Ignore Blocked Routes

☐ Circulate

☐ Uniform

☐ Percent

☒ Priority

☐ Label

☐ Shortest Queue

☐ Passive

☐ Jobs Matrix

☐ Cycle Matrix

☐ By Condition

☐ By Sequence

☐ By ML

To: Add Remove

1. Queue for Lavar

2. Fim abandono

Batching

OK Cancel Help Travel Place At

= 100 More >>

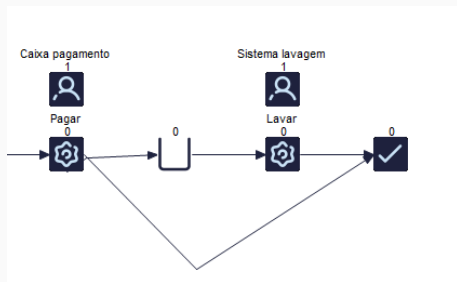
Figura 31: Modelação do *Routing Out* para o abandono dos sistema.

- ▶ No *Routing Out* da atividade Pagar é atribuída prioridade à saída para a fila Espera lavagem. Apenas quando a fila não pode receber mais ninguém (devido à capacidade), o itens são encaminhados para o Fim Abandono.

Exemplo: Caminhos alternativos

Exemplo: Bomba de combustível

Considere que apenas 40% dos carros se deslocam para a lavagem depois de efetuarem o pagamento. Determine um intervalo de confiança para o tempo médio de permanência de um carro na bomba de combustível.



Para modelar os caminhos alternativos adicionamos uma seta da atividade Pagar para o Fim do sistema, que representa os clientes que saem da bomba de combustível sem lavar o carro.

Figura 32: Modelação dos caminhos alternativos.

Exemplo: Caminhos alternativos

Routing Out From:

Discipline

☐ Ignore Blocked Routes

☐ Circulate

☐ Uniform

☒ Percent

☐ Priority

☐ Label

☐ Shortest Queue

☐ Passive

☐ Jobs Matrix

☐ Cycle Matrix

☐ By Condition

☐ By Sequence

☐ By ML

To:

1: 40.000000% Queue for Lavar

2: 60.000000% Saída

Total = 100.0

No *Routing Out* da atividade lavagem é possível definir a percentagem de clientes que seguem cada um dos arcos de saída existentes - soma perfaz 100%.

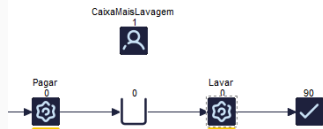
Figura 33: Parametrização *routing out* da lavagem.

O intervalo de confiança a 95% para o tempo médio de permanência de um carro na bomba de combustível é [16.05, 20.15].

Exemplo: Recursos - partilha de recursos

Exemplo: Bomba de combustível

Considere que o funcionário da caixa se despediu e que o funcionário da lavagem é agora responsável pelos pagamentos e pelas lavagens. Avalie o impacto do despedimento no tempo médio na bomba de combustível.



O recurso CaixaMaisLavagem é adicionado às atividades Pagar e Lavar.

Figura 34: Modelação da partilha de recursos para várias atividades.

O tempo médio de permanência no sistema passou a ser 159.82 minutos, o que corresponde a um aumento médio de 29.54 minutos relativamente ao caso base.

Exemplo: Recursos - múltiplos recursos para uma atividade

Exemplo: Bomba de combustível

Considere que os funcionários da caixa e da lavagem estão em formação. Assim, necessitam sempre de ser acompanhados pelo gerente para executar as suas tarefas. Avalie o impacto no tempo médio na bomba de combustível.

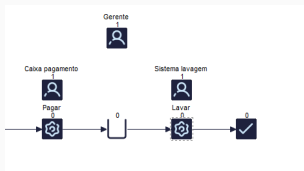


Figura 35: Modelação da necessidade de recursos múltiplos para uma atividade.

É necessário criar um novo recurso - Gerente - e adicioná-lo à lista de recursos necessários das atividades Pagar e Lavar.

- ▶ As atividades Pagar e Lavar só são executadas quando ambos os recursos necessários para a sua realização estão livres.

Nota: Não conseguimos saber quanto tempo do recurso Gerente foi ocupado com cada uma das atividades.

O tempo médio de permanência no sistema passou a ser 159.82 minutos. Note-se que este exemplo é semelhante ao do exemplo anterior uma vez que em nenhum dos casos as atividades Lavar e Pagar podem ser executadas em simultâneo.

■ As **etiquetas** são propriedades das entidades e servem para ter um controlo mais preciso das operações efetuadas na simulação.

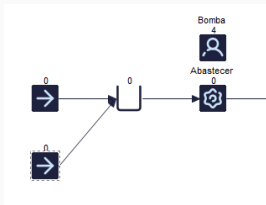
- ▶ **Etiquetas numéricas:** podem ser usadas para selecionar caminhos ou priorizar certas entidades. Também permitem obter resultados para cada etiqueta.
- ▶ **Etiquetas alfabéticas:** permitem a utilização de diferentes distribuições de probabilidade para a duração da mesma atividade, de acordo com uma etiqueta numérica.

■ As etiquetas também podem ser usadas para diferenciar o caminho a seguir pelas várias entidades. $\Rightarrow$ Não vamos ver nenhum exemplo deste caso.

Exemplo: Etiquetas numéricas

Exemplo: Bomba de combustível

Considere que existem clientes que fazem parte do programa de fidelização da bomba de combustível e, por isso, são clientes VIP tendo prioridade sobre a utilização dos recursos existentes passando à frente nas filas. Os clientes VIP chegam à bomba de combustível de acordo com uma Poisson com média de dois clientes a cada meia-hora e fazem o mesmo percurso que os restantes clientes. Compare o tempo médio de permanência no sistema dos clientes VIP com os clientes não VIP.



É necessário criar mais uma chegada para modelar a entrada dos clientes VIP na bomba de combustível.

Figura 36: Modelação das chegadas dos clientes VIP.

Exemplo: Etiquetas numéricas

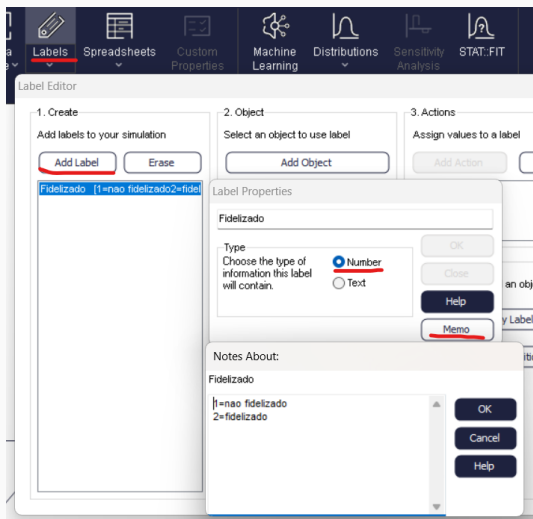


Figura 37: Criação de uma etiqueta numérica.

► Foi criada uma etiqueta numérica com o nome fidelizado que toma o valor 1 se o cliente for não fidelizado e o valor 2 se for fidelizado.

— O valor 0 está reservado para itens sem etiquetas, por isso não deve ser usado nas etiquetas definidas pelo utilizador.

Exemplo: Etiquetas numéricas

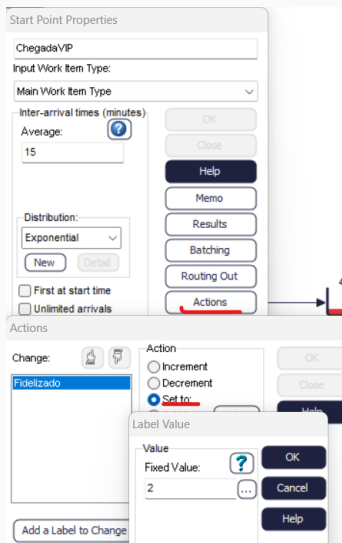


Figura 38: Atribuição das etiquetas numéricas às entidades temporárias.

Para atribuímos etiquetas às entidades temporárias, vamos às suas propriedades, ações (*Actions*), adicionamos a etiqueta e selecionamos *Set to* onde inserimos o valor indicado no *Memo*.

No exemplo, fixámos o valor a 2 pois quando criámos a etiqueta definimos que os clientes VIP tinham esse valor.

Exemplo: Etiquetas numéricas

The 'Queue Properties' dialog box has two tabs: 'Properties' and 'Visual Logic'. The 'Properties' tab is active. It contains the following fields and options:

- Queue Name: 'Espera abastecer' (text input)
- Capacity: (text input) with a checked 'Infinite' checkbox
- Shelf Life: (text input) with a checked 'None' checkbox
- Min Wait Time: (text input) with a '(minutes)' label and a help icon
- ☒ Prioritize (Fidelizado)
 - ☐ Reverse Priority (Low=first)
- ☐ High Volume
- ☐ Segregate Results

Buttons on the right: OK, Close, Help, Memo, Results, Start - Up, Contents, Graphics. At the bottom are 'Carbon' and 'Erase' buttons.

Figura 39: Parametrização das filas de espera para priorizar etiquetas.

Selecionar a opção *Prioritize*.

- ▶ Caso tenha sido atribuído o valor mais baixo ao mais prioritário selecionar a caixa *Reverse Priority*.

The 'Activity Properties' dialog box has a tab 'Activity Properties' and a sub-tab 'Priority'. The 'Priority' sub-tab is active. It contains the following fields and options:

- Activity Name: 'Abastecer' (text input)
- Timing (minutes): (text input) with a help icon
- Average: (text input) with a value of '4'
- Std Dev: (text input) with a value of '2'
- Distribution: 'Normal' (dropdown menu)
- ☐ High Volume

Buttons on the right: OK, Close, Help, Memo, Results, Resources, Efficiency, Routing In, Out, Actions, **Priority** (highlighted), On State Change.

The 'Priority' sub-tab contains:

- Priority Method:
 - ☐ Fixed (with a value of '50')
 - ☒ Label (Fidelizado)
 - ☐ Combined by Multiply (Max value = 100)

Buttons on the right: OK, Close, Help.

Figura 40: Parametrização das atividades para priorizar etiquetas.

No menu *Priority* selecionar a opção *Label*.

Exemplo: Etiquetas numéricas

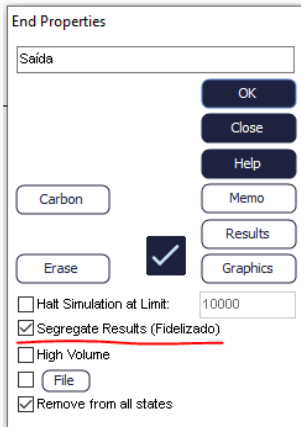


Figura 41: No ponto de saída do sistema selecionar a opção *Segregate Results*.

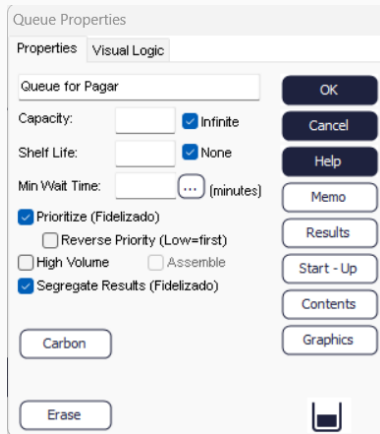
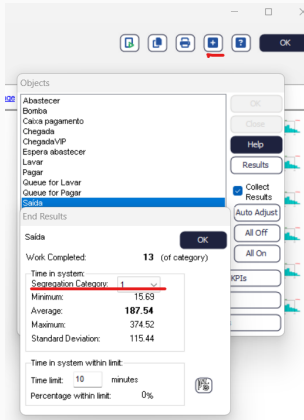


Figura 42: Nas filas de espera selecionar a opção *Segregate Results*.

- Estas opções permitem visualizar os resultados por etiqueta.

Exemplo: Etiquetas numéricas



- ▶ Clicar com o botão direito no objeto (Saída), escolher a *Segregation Category* e clicar com o botão direito na métrica a adicionar ao *Results Manager*.

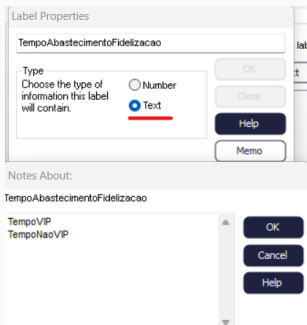
Figura 43: Adicionar os resultados para cada etiqueta ao *Results Manager*.

■ Correndo um *trial* da simulação com 50 corridas e semente = 2, obtemos que o tempo médio de permanência no sistema para clientes não fidelizados é 184.83 minutos e para os clientes VIP é 34.03 minutos.

Exemplo: Etiquetas alfabéticas

Exemplo: Bomba de combustível

O gerente das bombas está a estudar a hipótese de ter um funcionário sempre disponível para abastecer os clientes VIP nas bombas. Assim, o tempo de abastecimento dos clientes VIP diminuiria e seria modelado por uma Uniforme(1,2). Analise o impacto desta medida no tempo médio de permanência dos clientes VIP nas bombas.



- ▶ É criada uma etiqueta alfabética para representar as diferentes distribuições de probabilidade.

Figura 44: Criação etiqueta alfabética.

Exemplo: Etiquetas alfabéticas

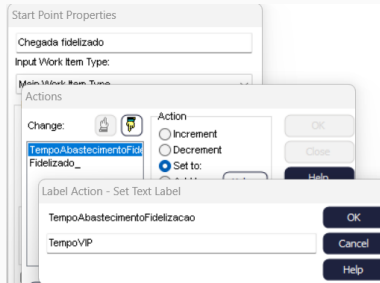


Figura 45: Atribuição da etiqueta alfabética à chegada dos clientes VIP.

- ▶ O valor da etiqueta TempoAbastecimentoFidelizacao é associada às chegadas normais e VIPs. No caso das chegadas VIPs, o valor da etiqueta alfabética é fixado a TempoVIP.
- ▶ Continuamos a ter a etiqueta numérica criada no exemplo anterior para podermos ver os resultados segregados.

Exemplo: Etiquetas alfabéticas

The screenshot shows a software interface with a dark blue header. The 'Distributions' menu is open, showing options: 'Distributions' (selected), 'Sensitivity Analysis', and 'STA'. Below the menu, a 'Named distribution' dialog box is displayed. The dialog has a title bar 'TempoVIP'. Inside, there is a 'Sample Value' section with a question mark icon. Below it are 'Lower Bound' (1) and 'Upper Bound' (2) input fields. The 'Distribution' is set to 'Uniform' in a dropdown menu. At the bottom is an 'Offset' field with the value 0. A vertical label 'Frequency' is on the right side of the dialog.

Figura 46: Criação de uma distribuição com nome.

- ▶ É criada uma distribuição com nome para o tempo de abastecimento dos VIP - representada na figura - e outra com o tempo de abastecimento dos não VIP.

⇒ As distribuições devem ter os nomes que a etiqueta alfabética pode tomar - TempoVIP e TempoNaoVIP.

Exemplo: Etiquetas alfabéticas

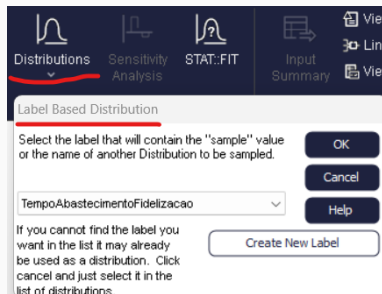


Figura 47: Criação de uma distribuição baseada em etiquetas.

- ▶ Após as distribuições TempoVIP e TempoNaoVIP estarem criadas, criamos uma nova distribuição baseada numa etiqueta - a etiqueta alfabética criada.

Exemplo: Etiquetas alfabéticas

Activity Properties

Abastecer

Timing (minutes) ?

OK

Cancel

Help

Memo

Results

Resources

Efficiency

Distribution:

TempoAbastecim

New Detail

☐ High Volume

Erase

Carbon

On State Change

Routing In Out

Actions

Priority

Replicate = 999

Contents

Graphics

Shifts

Figura 48: Definição da distribuição da atividade Abastecer baseada em etiquetas.

Após correr um *trial* com 50 corridas e semente = 2 obtemos que o tempo médio de permanência no sistema dos clientes VIP é 31.58. Assim, podemos verificar que contratar um funcionário para abastecer o carro dos clientes VIP apenas origina um decréscimo de aproximadamente 3 minutos no tempo médio de permanência no sistema dos clientes VIP.

- ▶ A distribuição da atividade Abastecer é a distribuição baseada em etiquetas TempoAbastecimentoFidelizacao.

Notas sobre modelos de simulação

- Quando implementamos um modelo de simulação devemos fazer a sua **validação**, isto é, verificar se o modelo replica o sistema real.
 - ▶ Os resultados obtidos com o modelo de simulação com a política atual têm que ser semelhantes aos resultados observados na prática.
 - ▶ Caso o sistema seja novo, validar o seu comportamento com o esperado utilizando dados reais.
- Devemos ter atenção às **condições iniciais e finais** da simulação.
 - ▶ Se as condições iniciais são fixas, devemos sempre partir das mesmas condições. Caso contrário, só devemos recolher estatísticas quando o sistema chegou a um estado estacionário.
 - ▶ Devemos também garantir que as condições finais do sistema são iguais às do sistema real.

-  M. Pidd (2004). *Computer Simulation in Management Science* John Wiley.
-  A. Law (2014). *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill.
-  Shalliker, J. & A. Suleman (2012). *Guia de Simulação Discreta por Computador usando SIMUL8*. Heybrook Associates & ISCTE – IUL Instituto Universitário de Lisboa.