

# Simulação e Otimização

## Capítulo 3: Simulação

---

Raquel Bernardino

[rbernardino@iseg.ulisboa.pt](mailto: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

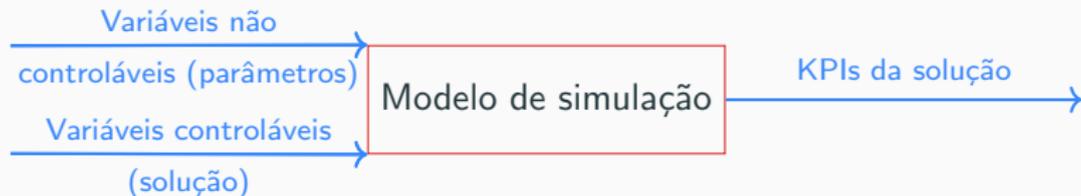
Modelação de várias características do sistema

- 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.

## ■ 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

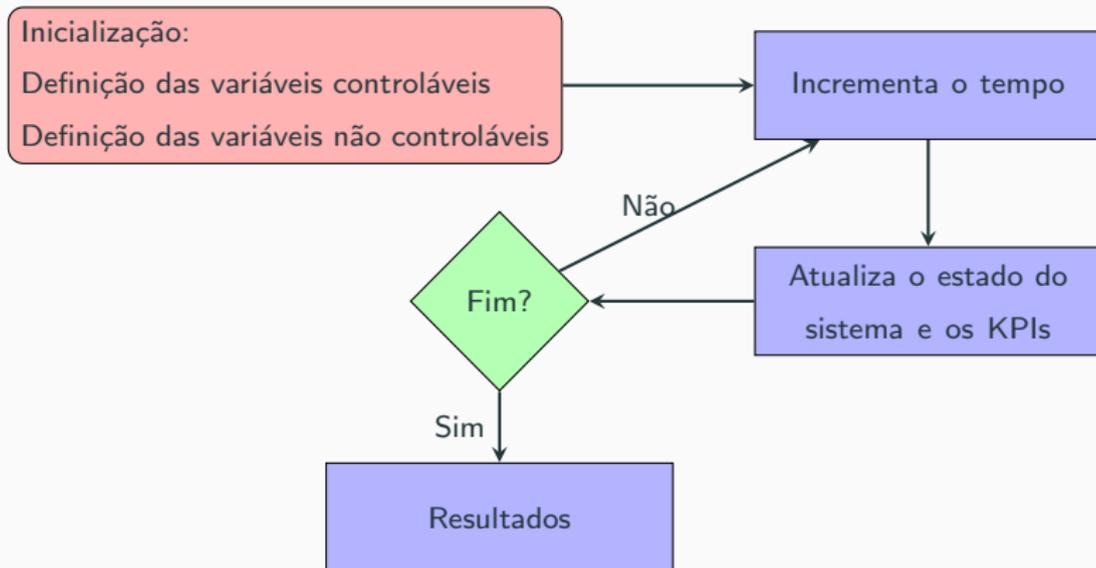
Implementação de um modelo de simulação

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 C5
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.  $\implies$  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.

- **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:

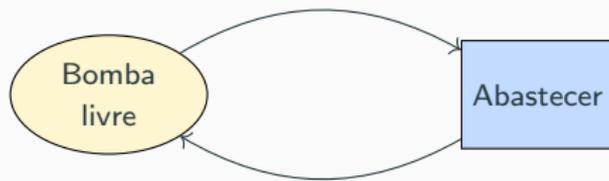
- ▶ Abastecer
- ▶ Pagar
- ▶ Lavar o carro
- ▶ Chegada (atividade fictícia)

## ■ Filas:

- ▶ Espera abastecer
- ▶ Espera pagar
- ▶ Espera lavagem
- ▶ Exterior (fila fictícia)

## Exemplo (continuação)

- Diagrama de ciclo de vida da bomba de combustível:



- Diagrama de ciclo de vida da caixa de pagamento:

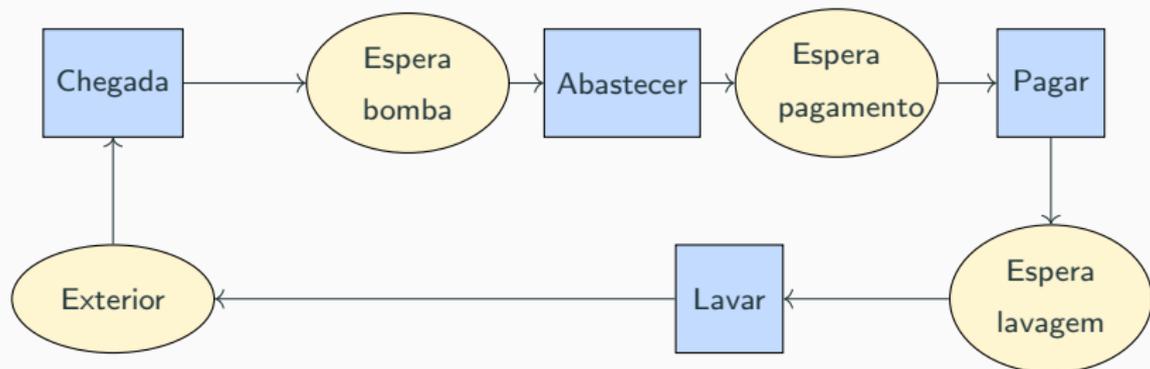


- Diagrama de ciclo de vida do sistema de lavagem:



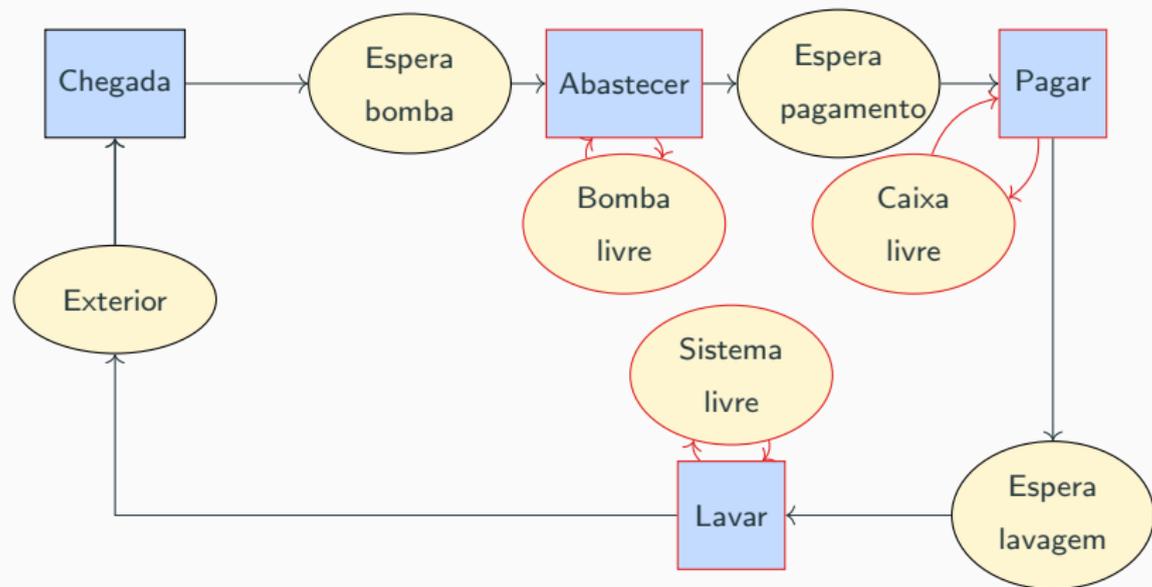
## Exemplo (continuação)

- Diagrama de ciclo de vida do cliente:



## Exemplo (continuação)

- Diagrama de ciclo de atividades:



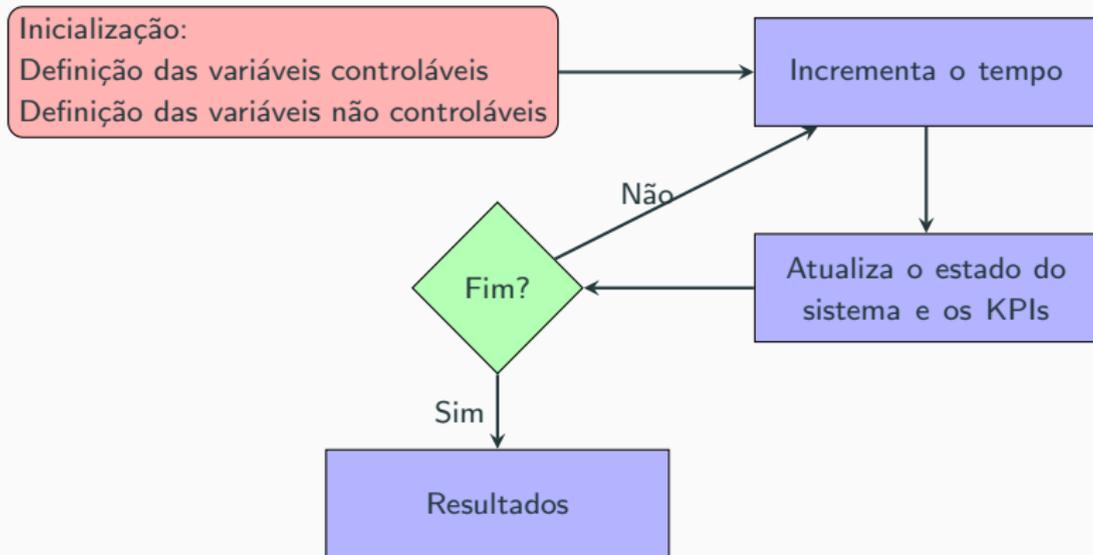
**Nota:** Para extrair informação do sistema através dos indicadores de performance temos que o implementar.

- ▶ 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

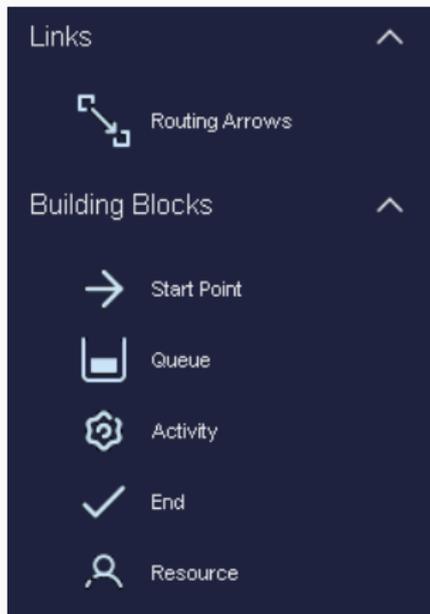
Diagramas de ciclo de atividades

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.



**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 e lavagem.
    - Existem quatro réplicas do recurso bomba de combustível.

## ■ Propriedades dos pontos de entrada

Start Point Properties

Chegada

Input Work Item Type:  
Main Work Item Type

Inter-arrival times (minutes)  
Average: 10

Distribution:  
Exponential

First at start time  
 Unlimited arrivals  
 None  File  
 Schedule Sheet  
 From WI State Chart  
 Day Planner

Erase  Ignore hints about lost Work Items

OK  
Cancel  
Help  
Memo  
Results  
Batching  
Routing Out  
Actions  
Graphics  
Carbon  
Constraints

**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*).

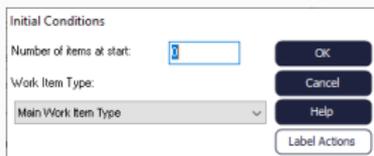
## ■ Propriedades das filas de espera



**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

Activity Properties

Abastecer

Timing (minutes)

Average: 10

Distribution: Average

New Detail

High Volume

Erase Carbon

On State Change

OK Cancel Help Memo Results Resources Efficiency Routing In Out Actions Priority Replicate = 1 Contents Graphics Shifts

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*

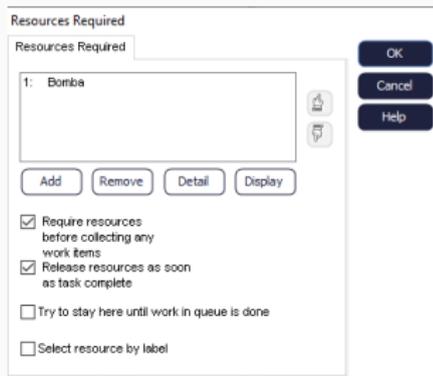


Figura 9: Propriedades *Resources*.



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

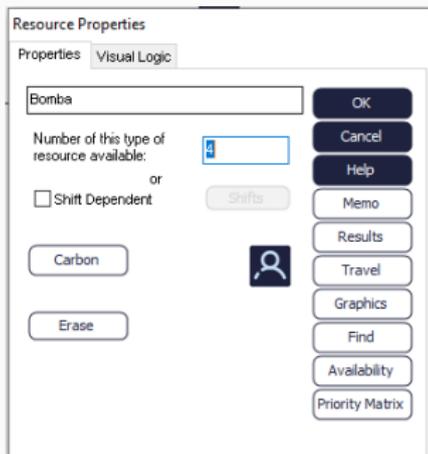
Results

Graphics

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

**Figura 11:** Propriedades do fim no Simul8.

## ■ Propriedades dos recursos



**Figura 12:** Propriedades dos recursos no Simul8.

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

## ■ Propriedades do relógio



**Figura 13:** Relógio no Simul8.

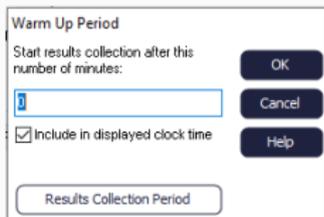
No relógio mostra o decorrer do tempo na simulação. Nas suas propriedades podemos:



**Figura 14:** Propriedades do relógio no Simul8.

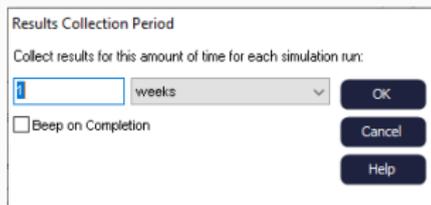
- ▶ Definir a unidade de tempo.
- ▶ Definir a forma como o tempo é apresentado assim como o formato do relógio.
- ▶ Definir quantos dias tem uma semana e quais são.
- ▶ Definir a que horas cada dia começa e qual é a duração do dia.

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



**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*).



**Figura 16:** Propriedades *Results Collection Period*.

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

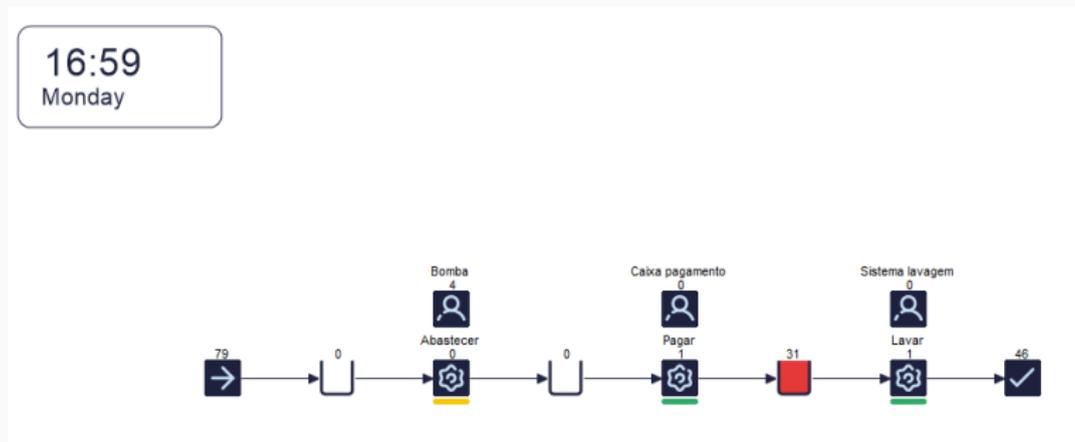
### Exemplo: Bomba de combustível

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).

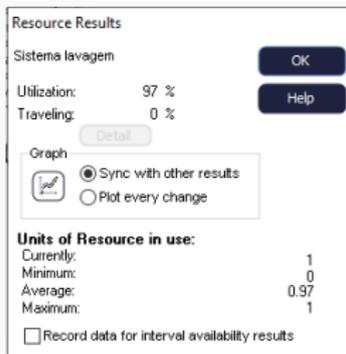


**Figura 17:** Estado do sistema no fim do dia simulado.

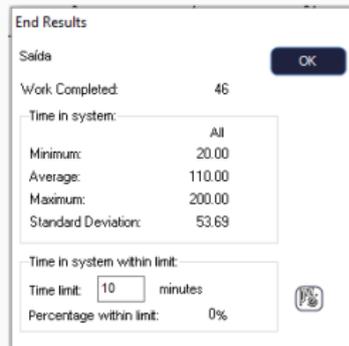
# Exemplo (continuação)



(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. ⇒  
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

# Controlar a simulação

- 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.

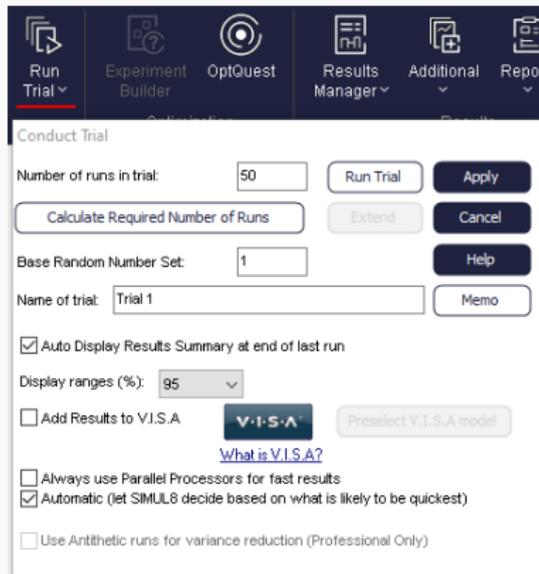
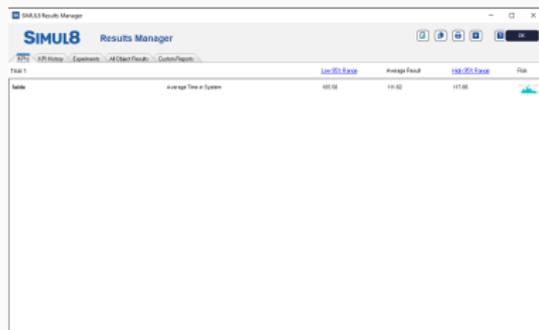


Figura 20: Menu para fazer várias corridas.

Podemos:

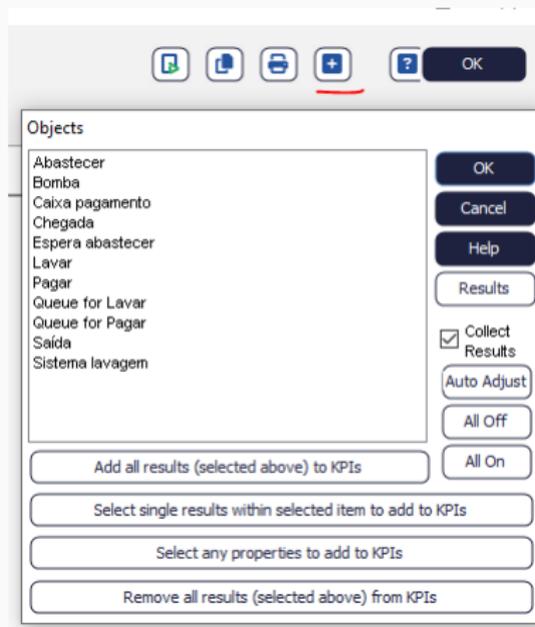
- ▶ Definir o número de corridas do *trial*.
  - Quanto maior a amostra melhor - 30 corridas é uma grande amostra.
- ▶ Calcular o número de corridas necessárias para garantir que temos convergência.
- ▶ Definir a semente do *trial*.
- ▶ Escolher o grau de significância dos intervalos de confiança apresentados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



Name	Average Time in System	Average Queue	Peak
	100:00	111:00	117:00

**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)

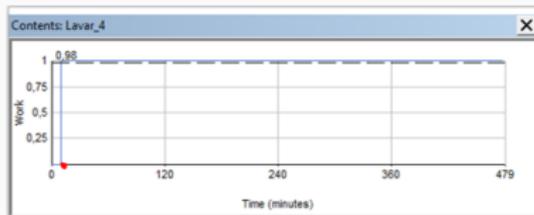
- Adicionando os resultados associados à fila de espera da bomba, do recurso bomba e do início obtemos:

Trial 1		Less 20% Flavour	Average Result	High 20% Flavour	Plot
Bomba	Utilization %	16.00	17.11	17.61	
	Minimum Use	0.00	0.00	0.00	
	Current Use	0.39	0.58	0.77	
	Average Use	0.06	0.08	0.70	
	Maximum Use	3.71	3.82	3.93	
Chegada	Traveling %	0.00	0.00	0.00	
	Number Entered	70.81	81.34	83.87	
	Number Left	0.00	0.00	0.00	
Espera abastecer	Net Number Entered	70.81	81.34	83.87	
	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 Contexts	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.  $\implies$  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

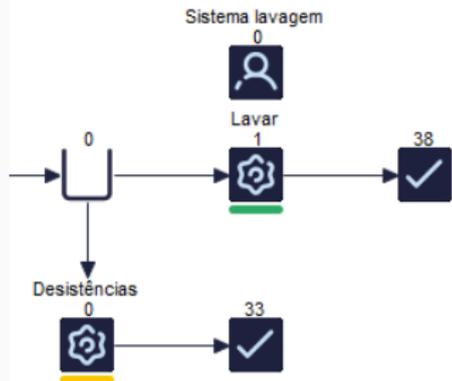
# Modelação de várias características do sistema

- 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.

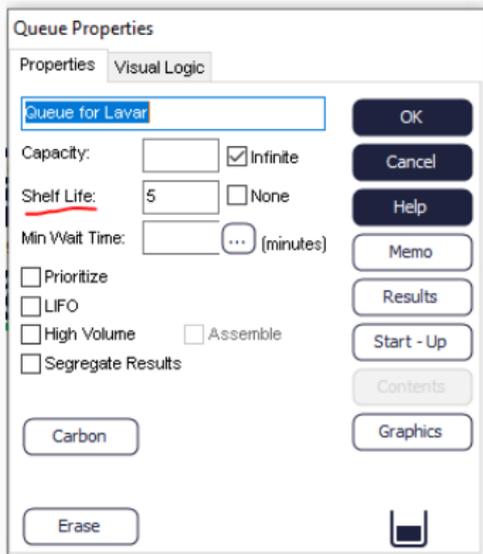


É criada uma nova atividade fictícia, com tempo nulo, para modelar as desistências. Também foi criado um novo objeto de fim para ser mais fácil determinar quantos clientes desistiram da lavagem.

Observando a figura, 33 clientes desistiram da lavagem.

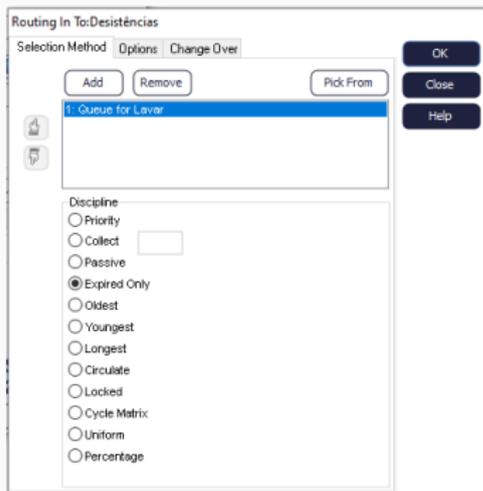
**Figura 25:** Modelação de desistências no Simul8.

# Exemplo: Abandonos prematuros do sistema - desistências



**Figura 26:** Modelação das desistências na fila de espera.

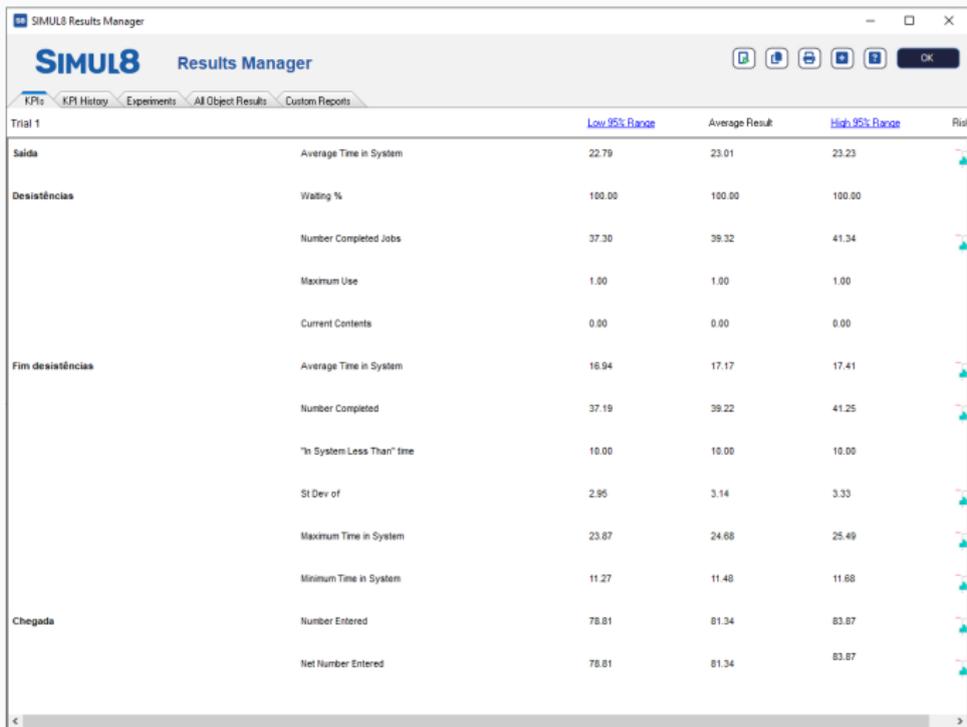
- ▶ O *Shelf Life* indica o tempo máximo que o cliente está na fila.



**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



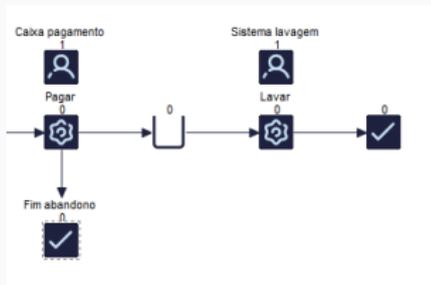
Trial 1		Low 95% Range	Average Result	High 95% Range	Risk	
<b>Saida</b>	Average Time in System	22.79	23.01	23.23		
	<b>Desistências</b>	Waiting %	100.00	100.00	100.00	
		Number Completed Jobs	37.30	39.32	41.34	
		Maximum Use	1.00	1.00	1.00	
<b>Fim desistências</b>	Current Contents	0.00	0.00	0.00		
	Average 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		
<b>Chegada</b>	Minimum Time in System	11.27	11.48	11.68		
	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.

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:

1. Queue for Lavar

2. Fim abandono

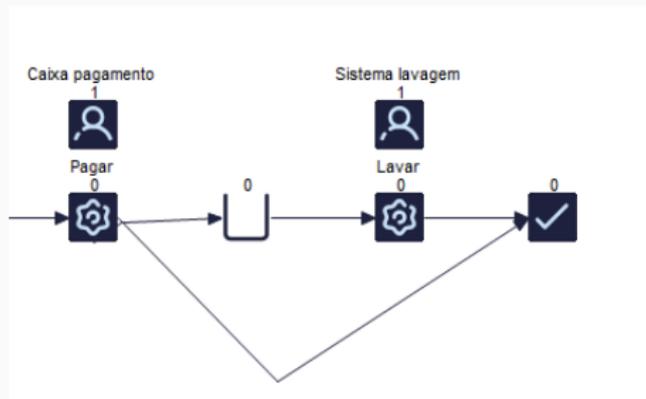
**Figura 31:** Modelação do *Routing Out* para o abandono dos sistema.

- ▶ 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.



**Figura 32:** Modelação dos caminhos alternativos.

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.

## 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%.

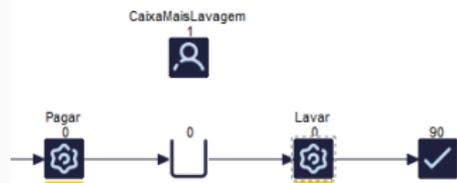
**Figura 33:** Parametrização *routing out* da lavagem.

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 lavagem. Avalie o impacto do despedimento no tempo médio na bomba de combustível.



O recurso CaixaMaisLavagem é adicionado às atividades Pagar e Lavar.

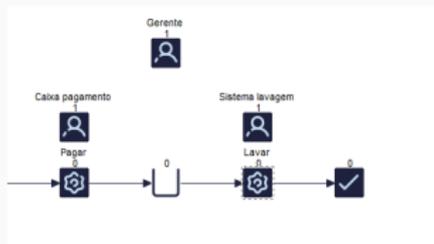
**Figura 34:** Modelação da partilha de recursos para várias atividades.

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.

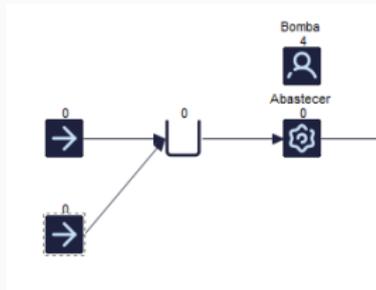
O tempo médio de permanência no sistema passou a ser 159.82 minutos. Note-se que este exemplo é semelhante ao do exemplo anterior uma vez que em nenhum dos casos as atividades Lavar e Pagar podem ser executadas em simultâneo.

- 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.  $\implies$  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

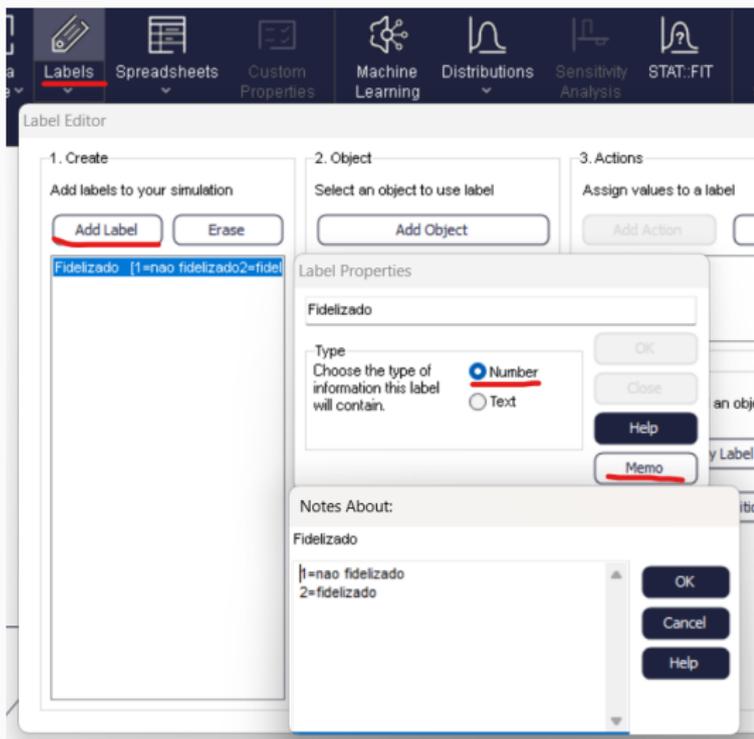
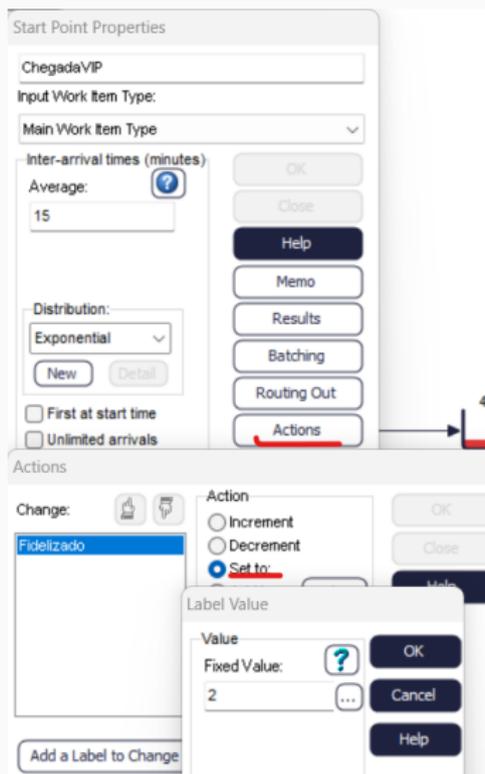


Figura 37: Criação de uma etiqueta numérica.

► 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 atribuirmos 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

Queue Properties

Properties Visual Logic

Espera abastecer

Capacity:  Infinite

Shelf Life:  None

Min Wait Time:  (minutes)

Prioritize (Fidelizado)

Reverse Priority (Low=first)

High Volume  Assemble

Segregate Results

Carbon

Erase

OK

Close

Help

Memo

Results

Start - Up

Contents

Graphics

**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*.

Activity Properties

Abastecer

Timing (minutes)

Average:  4

Std Dev:  2

Distribution:  Normal

High Volume

Erase

Carbon

On State Change

OK

Close

Help

Memo

Results

Resources

Efficiency

Routing In

Out

Actions

Priority

Priority Method

Fixed  50

Label (Fidelizado)

Combined by Multiply (Max value = 100)

OK

Close

Help

Caixa pagamento

Sister

Pagar

**Figura 40:** Parametrização das atividades para priorizar etiquetas.

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

## Exemplo: Etiquetas numéricas



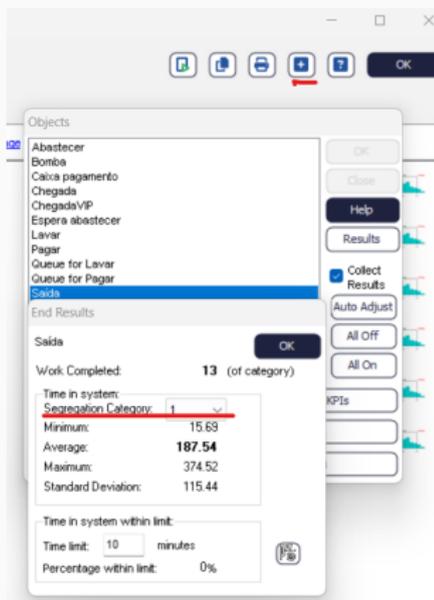
**Figura 41:** No ponto de saída do sistema selecionar a opção *Segregate Results*.



**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*.

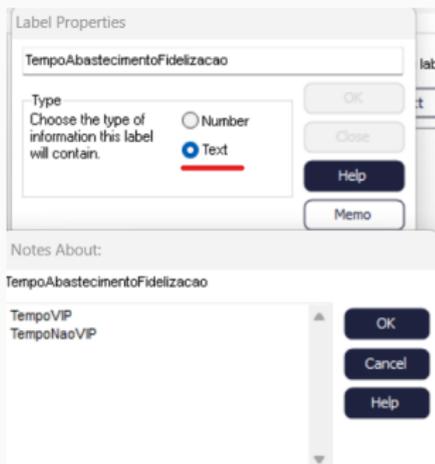
**Figura 43:** Adicionar os resultados para cada etiqueta ao *Results Manager*.

■ 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

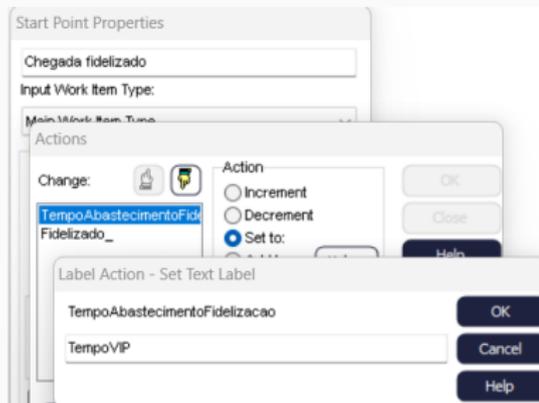
O gerente das bombas está a estudar a hipótese de ter um funcionário sempre disponível para abastecer os clientes VIP nas bombas. Assim, o tempo de abastecimento dos clientes VIP diminuiria e seria modelado por uma Uniforme(1,2). Analise o impacto desta medida no tempo médio de permanência dos clientes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

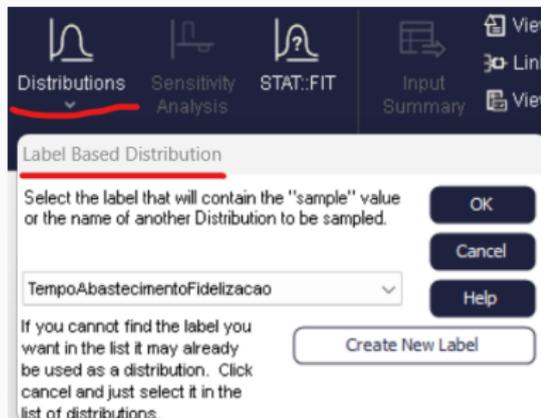
The screenshot shows a software interface with a dark blue header. On the left, there are three icons representing different distribution types. Below the icons, the word 'Distributions' is written in white and underlined. To its right, 'Sensitivity Analysis' and 'STA' are partially visible. Below this header, a white box contains the text 'Named distribution' with a red underline. Below that, the name of the distribution 'TempoVIP' is entered in a text field. The 'Sample Value' section includes a question mark icon. The 'Lower Bound' is set to '1' and the 'Upper Bound' is set to '2'. The 'Distribution' dropdown menu is set to 'Uniform'. The 'Offset' is set to '0'. On the right side of the dialog, the word 'Frequency' is written vertically.

- ▶ 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.

**Figura 46:** Criação de uma distribuição com nome.

## 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

The image shows a software interface titled "Activity Properties" for an activity named "Abastecer". The "Timing (minutes)" field is empty. The "Distribution" section is set to "TempoAbastecim" with "New" and "Detail" buttons. There is a "High Volume" checkbox which is unchecked. On the right side, there is a vertical stack of buttons: "OK", "Cancel", "Help", "Memo", "Results", "Resources", "Efficiency", "Routing In", "Out", "Actions", "Priority", "Replicate = 999", "Contents", "Graphics", and "Shifts". At the bottom left, there are buttons for "Erase", "Carbon", and "On State Change".

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

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

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.

- 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.