



LISBON
SCHOOL OF
ECONOMICS &
MANAGEMENT
UNIVERSIDADE DE LISBOA

MESTRADO
DECISÃO ECONÓMICA E EMPRESARIAL

TRABALHO FINAL DE MESTRADO
DISSERTAÇÃO

METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO DE POLÍTICAS DE
GESTÃO DE STOCKS EM CADEIAS DE ABASTECIMENTO
MULTINÍVEL UTILIZANDO SIMULAÇÃO

ANA FILIPA MORAIS BATISTA

OUTUBRO - 2015



LISBON
SCHOOL OF
ECONOMICS &
MANAGEMENT
UNIVERSIDADE DE LISBOA

MESTRADO EM
DECISÃO ECONÓMICA E EMPRESARIAL

TRABALHO FINAL DE MESTRADO
DISSERTAÇÃO

**METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO DE POLÍTICAS DE
GESTÃO DE STOCKS EM CADEIAS DE ABASTECIMENTO
MULTINÍVEL UTILIZANDO SIMULAÇÃO**

ANA FILIPA MORAIS BATISTA

ORIENTAÇÃO:

**JOSÉ ÁLVARO DA CRUZ ASSIS LOPES
LÍGIA DUQUE BATISTA AMADO**

OUTUBRO – 2015

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para a avaliação de políticas de gestão de *stocks* a serem aplicadas em cadeias de abastecimento multinível. Para tal, foi criada uma estrutura composta por um fabricante, um grossista e dois retalhistas, onde se consideram duas políticas de gestão de *stock*: ponto de encomenda e revisão cíclica.

Ao todo, foram analisados sete modelos, que resultam das combinações destas duas políticas no grossista e retalhistas, através de um *software* de simulação e otimização, *ExtendSim8*[®]. Utiliza-se um processo de otimização integrada que recorre a um algoritmo genético e evolutivo associado à simulação, de forma a definir os parâmetros de gestão mais adequados à análise de um produto durável de alta rotação.

Posteriormente, são discriminados os custos de gestão (custo de rutura e manutenção) para as estruturas ensaiadas e é concretizada uma análise de sensibilidade aos custos mais relevantes. Por fim, são realçadas as principais conclusões deste estudo.

Palavras-Chave: Cadeia de abastecimento; política de ponto de encomenda; política de revisão cíclica; simulação; otimização.

ABSTRACT

This research project applies a methodology for the evaluation of inventory control policies employed in multi-echelon supply chains. With that purpose, a structure was created that consists of one manufacturer, one wholesaler and two retailers, where two inventory policies were considered: reorder point policy and periodic review policy.

In all, seven models were analyzed which resulted from the application of each of these two policies to the wholesaler and the retailers (respectively), by using the simulation and optimization *software*, *ExtendSim8*[®]. An integrated optimization process that applies a genetic and evolutionary algorithm associated with the simulation was employed, which sets the most appropriate management parameters to analyze a fast moving item.

Afterwards, the management costs are discriminated between shortage and holding costs, for the different scenarios considered and a sensitivity analysis is performed for the most relevant costs. Lastly, the main conclusions drawn from this study are highlighted.

Keywords: Supply chain; reorder point policy; periodic review policy; simulation; optimization.

ÍNDICE

1. Introdução e metodologia	1
1.1. Introdução	1
1.2. Metodologia	2
2. Políticas de gestão de stocks em cadeias de abastecimento	4
2.1. Cadeia de abastecimento e gestão de stocks	5
2.2. Modelos analíticos de gestão de stocks	6
2.3. Limitações mais relevantes dos modelos analíticos	7
3. Aplicação de simulação no estudo de cadeias de abastecimento	8
3.1. Algumas aplicações relevantes	10
3.2. Otimização em simulação	13
4. Cenários empíricos e modelação	16
4.1. Estrutura da cadeia de abastecimento	16
4.2. Políticas de gestão de stocks	17
4.3. Definição de parâmetros	19
4.4. Os modelos de simulação	21
5. Análise de resultados	28
6. Conclusões.....	33
7. Bibliografia	36
8. Anexos.....	41
8.1. Blocos <i>ExtendSim</i>	41
8.2. Exemplos <i>ExtendSim</i>	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura da metodologia	3
Figura 2: Estrutura da cadeia de abastecimento	16
Figura 3: Política de ponto de encomenda	17
Figura 4: Política de revisão cíclica	18
Figura 5: Política de ponto de encomenda no grossista	21
Figura 6: Política de revisão cíclica no grossista	22
Figura 7: Custos aos níveis do grossista e retalhista	23
Figura 8: Política de ponto de encomenda nos retalhistas	24
Figura 9: Política de revisão cíclica nos retalhistas	25
Figura 10: Custos totais do sistema	25
Figura 11: Blocos Optimizer e Plotter	26

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1: Políticas de gestão de stocks nos diferentes níveis da cadeia de abastecimento	19
Quadro 2: Parâmetros base da experimentação	21
Quadro 3: Resultados da otimização (para 500 dias)	28
Quadro 4: Intervalos de confiança (95%) para o valor médio diário dos custos nas várias estruturas de cadeia de abastecimento	30
Quadro 5: Discriminação de custos por natureza para as várias estruturas de cadeia de abastecimento	33

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Custos totais em função dos custos de rutura para as várias estruturas de cadeia de abastecimento	31
Gráfico 2: Custos totais em função das estruturas de cadeia de abastecimento para os vários custos de rutura	32

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Estrutura PPR desenvolvida em ambiente ExtendSim8	42
Anexo 2: Estrutura RPR desenvolvida em ambiente ExtendSim8	43

1. Introdução e metodologia

1.1. Introdução

Atualmente, as organizações encontram-se numa situação de permanente mudança, redefinição e adaptação ao mercado e à procura. Deste modo, torna-se cada vez mais importante concretizar uma boa gestão dos seus recursos. Independentemente da situação financeira que o país atravessa, as organizações têm sempre o objetivo de otimizar as suas estruturas, tentando obter o máximo de lucro com o mínimo de recursos. A cadeia de abastecimento exerce uma grande influência sobre a estratégia competitiva de uma organização, devido ao facto de abranger toda a estrutura. A sua gestão torna-se, por isso, num processo muito complexo, que requer uma atenção acrescida.

Dentro da cadeia de abastecimento, é possível identificar um problema recorrente e comum à grande maioria das organizações, que é o da gestão de *stocks* (ou inventários). Uma vez que a procura por parte dos clientes é variável, torna-se necessário decidir qual o nível de *stock* mais adequado, em cada nível da cadeia.

Este não é um problema novo, mas é cada vez mais comum, devido à velocidade com que os mercados evoluem. O facto de não se conseguir encontrar uma solução consensual faz com que o problema persista e seja alvo de contínuos estudos, na tentativa de aperfeiçoar os resultados sucessivamente obtidos.

Neste trabalho define-se uma metodologia para apoiar a decisão relativa às políticas de gestão de *stocks* a serem adotadas numa cadeia de abastecimento multinível. Para tal, desenvolve-se um modelo onde é possível analisar o comportamento da cadeia de abastecimento para um produto durável de alta rotação, recorrendo ao suporte de um *software* de simulação.

No primeiro capítulo introduz-se e identifica-se o problema, salientando-se a sua relevância. É também descrita a abordagem metodológica empregue ao longo do trabalho.

No capítulo 2 é apresentada a definição de cadeia de abastecimento, os métodos utilizados na definição de políticas de gestão de *stocks* multinível e as limitações verificadas na generalidade dos modelos analíticos investigados.

O capítulo seguinte é dedicado à utilização da simulação como método alternativo, na resolução deste tipo de problemas. Enunciam-se as contribuições mais relevantes nesta área e, no final do capítulo, são exploradas as particularidades e potencialidades da combinação da otimização em simulação.

A parte prática deste trabalho é apresentada no capítulo 4, onde se encontram os cenários empíricos, a descrição das políticas utilizadas e a definição dos parâmetros de *input*. É também descrito o funcionamento dos modelos desenvolvidos através do *software ExtendSim 8*[®].

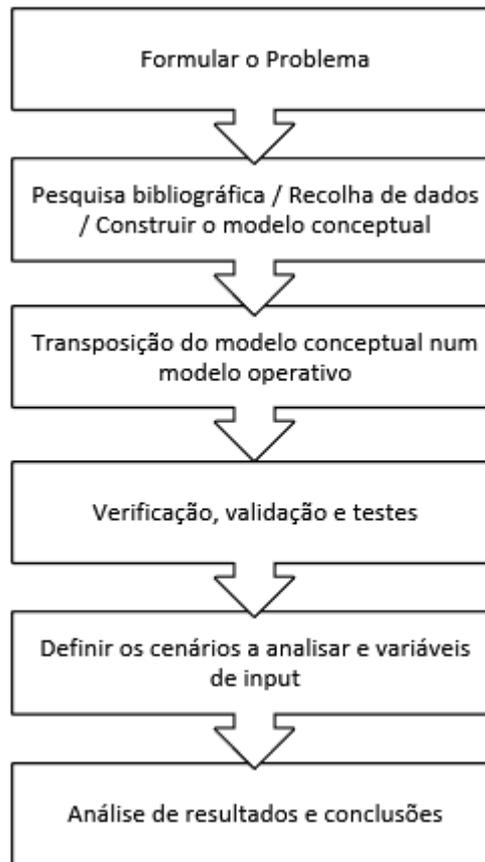
Segue-se o capítulo 5, onde se analisam os resultados obtidos na otimização e simulação dos modelos.

Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões, ao que se segue a bibliografia consultada e que serviu de suporte ao desenvolvimento da investigação.

1.2. Metodologia

De modo a analisar e avaliar problemas de gestão de *stocks* que envolvam cadeias de abastecimento multinível, optou-se por adotar a mesma metodologia seguida por Law (2003), que se encontra esquematizada na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura da cadeia de abastecimento



Adaptado de Law (2003)

Começa-se por formalizar o problema, onde se define o objetivo do estudo, as questões a serem respondidas e a configuração do sistema.

Segue-se a fase da pesquisa bibliográfica e recolha de dados. Neste ponto, tenta-se compreender o problema em questão através da análise de estudos e documentos publicados. De seguida, constrói-se o modelo conceptual, no qual se estrutura o sistema a ser desenvolvido, identificam-se as limitações e verifica-se se todos os pressupostos estão corretos e completos.

Na próxima etapa, faz-se a transposição do modelo conceptual num modelo operativo. A transposição pode ser feita recorrendo a programação, onde se desenvolve

de raiz o procedimento para resolver o problema ou em alternativa utilizando *softwares* especializados (já desenvolvidos).

Realiza-se de seguida a verificação do modelo operativo, de modo a averiguar a sua consonância com o modelo conceptual e a sua operacionalidade. Na fase de validação, verifica-se se o modelo criado é uma boa representação da realidade, através da comparação dos resultados recolhidos na primeira fase com os obtidos através do modelo.

Definem-se as variáveis e parâmetros de *input*, nomeadamente, custos, distribuições estatísticas, *warm-up period*, réplicas, entre outros; bem como os cenários a analisar e as variações a incluir.

Para finalizar, descrevem-se os procedimentos utilizados e analisam-se os principais resultados, sendo retiradas as conclusões.

2. Políticas de gestão de stocks em cadeias de abastecimento

A capacidade de organização, gestão e planeamento da cadeia de abastecimento é um dos aspetos essenciais ao bom desempenho por parte das organizações. Deste modo, importa definir claramente o conceito de gestão da cadeia de abastecimento.

A gestão da cadeia de abastecimento consiste na administração eficiente de todas as organizações, processos e atividades que fazem parte do desenvolvimento de um produto (e.g. *design*, produção, distribuição), desde a sua conceção até à venda aos clientes finais (Swaminathan, 2000).

2.1. Cadeia de abastecimento e gestão de stocks

A cadeia de abastecimento, por sua vez, pode ser definida como sendo um processo integrado, no qual se incluem, entre outros, fornecedores, distribuidores, retalhistas e clientes. Estes interagem entre si, através de fluxos, adquirindo matérias-primas, transformando-as em produtos intermédios e/ou finais e fornecendo esses produtos aos consumidores finais, com o objetivo de obter lucro para todos os intervenientes no processo (Seco & Vieira, 2014; Beamon, 1998).

Os fluxos podem ser divididos em fluxos de informação, fluxos de matérias-primas e fluxos financeiros. Os fluxos de matérias-primas iniciam-se no topo da cadeia (fornecedores) e percorrem todos os membros até à base (clientes), ao passo que os fluxos de informação ocorrem em ambos os sentidos. A complexidade da cadeia é definida pela interação dos seus membros e pela quantidade de fluxos por estes gerados. (Akkermans et al., 2003; Cheng et al., 2014).

Com base nas suas características, os modelos de cadeias de abastecimento podem ser classificados em quatro categorias: modelos determinísticos (não probabilísticos) onde se assume que todos os parâmetros do modelo são conhecidos e previamente fixados; modelos estocásticos (probabilísticos), onde os parâmetros podem assumir valores incertos, desconhecidos ou aleatórios; modelos híbridos, que combinam características dos modelos anteriores e modelos *IT-Driven* que integram e coordenam diversas fases do planeamento da cadeia em tempo real, recorrendo a *software* especializado (Min & Zhou, 2002).

A existência de *stock* é essencial a grande parte das organizações, pois ajuda a atenuar os efeitos da procura (aleatória) dos clientes. A gestão de *stocks* é um problema que afeta e influencia a cadeia de abastecimento, na medida em que são raras as cadeias

que a não utilizam. O *stock* é constituído pelos produtos (ou matérias-primas) que são adquiridos e armazenados até se concretizar a sua utilização (Barroso, 2012).

Neste trabalho irão ser exclusivamente utilizados modelos estocásticos, nomeadamente, o modelo de ponto de encomenda e o de revisão cíclica.

2.2. Modelos analíticos de gestão de stocks

Atualmente, existem inúmeras vias para abordar e encontrar soluções para problemas relacionados com a cadeia de abastecimento. Deve-se no entanto tentar encontrar a abordagem mais adequada a cada caso e adaptá-la ao problema em questão. Segundo Ganeshan et al. (1999, p.853), estas aproximações podem ser agrupadas do seguinte modo:

1. Modelos conceptuais e não quantitativos: analisam a cadeia com a finalidade de tentar desenvolver um método de gestão sem recurso a modelos quantitativos;
2. Casos orientados e estudos empíricos: estuda-se a atividade empresarial numa área específica com o objetivo de recolher informação relevante para gerir a cadeia;
3. *Frameworks*, *taxonomics* e revisão de literatura: agrupam-se e explicam-se todos os conceitos inerentes à cadeia de modo a compreender o problema na sua totalidade;
4. Modelos quantitativos (incluem otimização, simulação, modelos estocásticos, modelos analíticos e heurísticas): desenvolve-se um modelo de gestão da cadeia utilizando estruturas de natureza matemática.

Na resolução de problemas de gestão de *stocks* recorre-se normalmente a modelos analíticos, uma vez que estes apresentam normalmente uma descrição formal matemática, que pode ser constituída por sistemas de equações lineares, equações diferenciais ou processos estocásticos (Shalliker & Suleman, 2012, p.2).

No entanto, grande parte da literatura existente limita-se a aplicar estas aproximações apenas a configurações simplificadas ou específicas da cadeia de abastecimento. O facto da grande maioria dos problemas reais serem extremamente complexos, inviabiliza muitas vezes esta utilização. À medida que a complexidade do problema aumenta, a sua formulação através de equações torna-se cada vez mais difícil. Como resultado, os modelos analíticos transformam-se em simplificações e/ou aproximações da realidade, incluindo apenas alguns aspetos relevantes, mas não suficientes, para a representar (Bottani & Montanari, 2010; Bertrand & Fransoo, 2002; Dellino et al., 2014).

2.3. Limitações mais relevantes dos modelos analíticos

Conforme referido, os modelos analíticos apresentam algumas limitações, das quais se destacam as seguintes: não conseguem suportar o conjunto de *input's* necessário para representar de forma realística os problemas (Fleischmann et al., 1997); o tempo de processamento na obtenção de soluções para a gestão é muito elevado; os modelos não são suficientemente flexíveis (Yadav et al., 2009); não são capazes de abordar cenários complexos de modo eficaz; a transcrição do modelo conceptual num modelo analítico é um processo muito demorado; não conseguem lidar com todas as variáveis estocásticas da cadeia de abastecimento e as suas constantes modificações (Longo & Mirabelli, 2008).

É de salientar também que, em problemas complexos onde existem múltiplos níveis e inúmeros produtos, é fundamental ter uma visão integrada de toda a cadeia, algo que é extremamente difícil de alcançar através deste tipo de abordagem (Bottani et al., 2013).

Atendendo a estas limitações, torna-se complicado usar modelos analíticos para estudar e analisar problemas de gestão de *stocks* em que a cadeia de abastecimento é complexa, na medida em que estes apenas são capazes de apresentar soluções ótimas de forma eficiente em estruturas parciais e muito simplificadas (Bottani et al., 2013; Ingalls, 1998).

Uma vez que este trabalho visa estudar uma cadeia de abastecimento multinível, a utilização de modelos analíticos não é a aproximação mais apropriada. Em alternativa, recorreu-se à simulação como forma de ultrapassar as limitações mencionadas anteriormente (Long & Zhang, 2014).

3. Aplicação de simulação no estudo de cadeias de abastecimento

A natureza competitiva dos mercados e as constantes alterações verificadas ao nível do fornecimento e da procura, requerem por parte das organizações uma atenção especial. Existe, assim, uma necessidade constante de adaptação a novas condições (fatores externos). Quanto mais rápida for esta adaptação, menores serão as consequências para a cadeia, em termos de custos e inventário (Cheng et al., 2014).

Com a dificuldade de se utilizar modelos analíticos, surge a simulação, como um método alternativo para abordar este tipo de problemas. A principal vantagem dos modelos de simulação, face aos analíticos, é o facto de serem mais flexíveis, permitindo uma adaptação mais fácil e rápida a alterações e ao problema em si, quase não sendo

necessário efetuar simplificações às condições iniciais do problema (Dellino et al., 2014).

Assim, importa definir em que é que consiste a simulação. A simulação é uma técnica que envolve um modelo, sendo este uma representação de um sistema ou organismo real sobre o qual se podem realizar experiências e testes. “O modelo é uma representação externa e explícita de parte da realidade, por quem a deseja utilizar para perceber, mudar, gerir ou controlar essa mesma realidade” (Lopes, 2013, p.5 com base em Pidd, 1996). Por outro lado, um sistema pode ser encarado como um conjunto de objetos aos quais se associam atributos e funções, e que interagem de forma harmoniosa de modo a atingir um determinado objetivo (Cheng et al., 2014 em Batista & Lopes, 2015).

O desenvolvimento de modelos de simulação para a análise de cadeias de abastecimento possui várias finalidades, como, por exemplo: melhorar o desempenho da cadeia; ser uma ferramenta no apoio à tomada de decisão; aperfeiçoar a estrutura do sistema; ou realizar testes prévios aos sistemas propostos (ou a sistemas reais antes da implementação de alterações). As melhorias são alcançadas através da realização de pequenas modificações e ajustes nos parâmetros do modelo (Buchholz & Thümmler, 2005; Long & Zhang, 2014; Maguire, 1972).

Existem alguns aspetos a ter em conta quando se abordam problemas de cadeia de abastecimento através de modelação e simulação, uma vez que a aproximação convém ser: flexível e paramétrica, de forma a ponderar cenários distintos; eficiente em termos de tempo, pois existe o risco de os produtos se tornarem obsoletos; uniforme, ou seja, a sua arquitetura ao longo da cadeia não deve variar muito, pois desta forma é possível efetuar alterações mais facilmente (Longo & Mirabelli, 2008; Barroso, 2012).

Tendo em conta o que foi mencionado, é frequente a utilização de modelos de simulação. Na próxima secção são apresentados alguns exemplos de trabalhos que utilizam a simulação como processo que permite resolver de forma ajustada alguns dos problemas da cadeia de abastecimento.

3.1. Algumas aplicações relevantes

Ao longo dos anos a literatura nesta área tem salientado a importância e o contributo da utilização de modelos de simulação na análise e resolução de problemas de cadeia de abastecimento (Fu, 2002).

Embora os resultados provenientes da simulação possam vir a ter, em alguns casos, uma qualidade inferior aos obtidos através de modelos analíticos, a quantidade de tempo despendido na obtenção de soluções, a facilidade em encontrar soluções próximas do ótimo e a abrangência do tipo de problemas estudados (em termos de complexidade) pode compensar. Existe por isso, um *trade-off* entre qualidade e rapidez (Soysal et al., 2012; Bertrand & Fransoo, 2002).

Diversos autores têm recorrido a modelos de simulação com o intuito de investigar e analisar os efeitos de utilizar diversos recursos, diferentes políticas e capacidades logísticas, em cadeias de abastecimento (Melouk et al., 2012).

O primeiro modelo matemático para problemas multinível e multiproducto foi desenvolvido por Sherbrooke (1968), intitulado METRIC (e posteriormente VARIMETRIC). Este modelo foi aplicado pelas forças armadas com a finalidade de otimizar, redistribuir e avaliar o desempenho das suas bases. Analisou-se um grupo de *itens* recuperáveis (e.g. armas), uma vez que estes acarretavam elevados custos e tinham uma fraca procura. O modelo foi baseado em vários pressupostos, nomeadamente, a

procura admitir uma distribuição de *Poisson* e ser estacionária durante o período em análise, o local onde as unidades são reparadas depender da complexidade da reparação, minimizar o número de *backorders* ou não ser permitido o fornecimento para além dos elementos considerados nos vários níveis, entre outros.

Com o decorrer do tempo e devido às melhorias registadas em termos informáticos, os modelos têm sido desenvolvidos e melhorados de modo a poderem ser aplicados a diversos cenários dentro da cadeia de abastecimento, como veremos de seguida.

O trabalho desenvolvido por Chan & Chan (2005) utiliza a simulação para construir e testar 5 modelos de cadeia de abastecimento (composta por 3 fornecedores, 3 fabricantes, 2 retalhistas e 3 clientes). A finalidade do trabalho era determinar quais as configurações que atingiam o desempenho ótimo, em termos de nível de *stock*, tempo médio de entrega, recursos utilizados e custos de transporte.

Daniel & Rajendran, (2005) testaram várias abordagens na avaliação do desempenho de um produto numa cadeia de abastecimento multinível dividida em 4 níveis (retalhista, distribuidor, fabricante e fornecedor). Foi aplicada a política de revisão cíclica em todos os níveis e foram assumidas várias configurações para a cadeia, que divergiam nos valores dos custos (de manutenção e rutura) e tempo (de entrega). Todas as estruturas foram otimizadas utilizando várias abordagens (algoritmo genético e procedimentos de pesquisas aleatórias). A análise concluiu que a diferença entre os resultados obtidos através de algoritmos genéticos e os obtidos através dos outros procedimentos não era significativa.

Bottani & Montanari (2010) desenvolveram um modelo de simulação de eventos discretos, de modo a analisar o comportamento de um bem de consumo rápido numa

cadeia de abastecimento. Pretendia-se que o modelo identificasse e avaliasse de forma quantitativa as consequências de realizar modificações à configuração base da cadeia, bem como o impacto destas no custo total e no efeito *bullwhip*. O efeito *bullwhip* é um fenómeno em que a variância da procura é amplificada ao longo da cadeia de abastecimento. Assim, ainda que na base (clientes) a variabilidade registada seja muito reduzida, à medida que se avança até ao topo (fornecedores) a instabilidade vai aumentando (Lee, 1997). Ao todo, foram analisadas trinta (30) configurações diferentes da cadeia de abastecimento, que resultaram da combinação de diversos parâmetros (e.g. número de níveis (entre 3 e 5), políticas de gestão de *stock* (quantidade económica de encomenda ou intervalo económico de encomenda), partilha de informação sobre a procura, entre outros). As estruturas foram desenvolvidas em ambiente *Simul8*TM. O estudo conclui que todos os parâmetros têm impacto na estrutura total (custos e efeito *bullwhip*), embora em diferentes proporções. Os mais significativos foram a quantidade de níveis da cadeia e a política de *stocks* empregue.

No trabalho desenvolvido por Kopytov & Muravjov (2011) foi considerado um sistema de controlo de inventário composto por dois níveis (correspondentes ao armazém e clientes), onde se analisou um produto com procura estocástica. Ambos os níveis podiam assumir dois modelos de encomenda diferentes: (1) ponto de encomenda fixo e quantidades fixas; (2) período fixo entre encomendas. O objetivo era definir a melhor estratégia a adotar por parte dos armazéns de modo a minimizar os custos associados ao inventário. Os autores recorreram ao *software ExtendSim 8*[®] para simular o sistema.

Lopes & Matos (2014) desenvolveram uma metodologia para comparar os resultados obtidos através de simulação e de modelos matemáticos quando aplicados a

políticas de gestão de *stocks*. As políticas examinadas foram as de ponto de encomenda, revisão cíclica e mista (que combina as duas anteriores). Os resultados da simulação foram obtidos com recurso ao *software ExtendSim8*[®], onde foram desenvolvidos modelos que representassem as políticas em questão e posteriormente foram otimizados de forma individualizada. Analisou-se um produto durável de elevada rotação, sendo o objetivo a minimização de custos da política.

Importa ainda realçar alguns trabalhos incontornáveis de cadeia de abastecimento (e.g. Chopra & Meindl (2007)) e de modelos analíticos multinível (e.g. Silver et al., (1998)), por serem a base da maioria dos desenvolvimentos e melhorias verificadas em termos de modelos e políticas associadas à gestão de *stocks* em cadeias de abastecimento.

3.2. Otimização em simulação

Tal como foi referido, na gestão da cadeia de abastecimento os problemas são demasiado complexos para serem estudados através de modelos analíticos. Por conseguinte e segundo a literatura, é preferível recorrer à simulação, pois esta tem mostrado ser uma ferramenta viável e útil para encontrar soluções alternativas para estes problemas. Uma simples avaliação de desempenho é recorrentemente insuficiente, sendo necessário realizar-se um processo exploratório sob a forma de otimização em simulação (Ólafsson & Kim, 2002).

No Handbook of Simulation, Fu (2014) refere que “as duas abordagens mais importantes em termos de técnica de pesquisa e gestão são a simulação e a otimização”.

Contudo, a otimização por via da simulação acarreta algumas dificuldades, nomeadamente, a impossibilidade de medir o desempenho do sistema de forma exata

(Fu, 2002). Assim, o sucesso da otimização em simulação, na prática, depende da forma como as duas componentes interagem, de modo a fornecer aos utilizadores soluções eficazes e alternativas para avaliar a qualidade das soluções encontradas (Fu et al., 2014).

A troca de informação entre as componentes de simulação e de otimização num modelo de otimização em simulação é fundamental para que o modelo convirja para uma solução de boa qualidade. Assim, este processo ocorre em geral da seguinte maneira: a componente de otimização vai fornecendo algumas soluções de teste (valores para as variáveis de decisão) à componente de simulação, de forma a esta poder avaliar o desempenho do sistema. A componente de simulação é executada com estas variáveis de maneira a gerar um *output* que indique a qualidade da solução de teste. O *output* por sua vez, retorna ao otimizador, que utiliza a informação da simulação para de seguida obter uma nova solução. O processo é repetido até se alcançar um critério de convergência e, nessa altura, a melhor solução encontrada até ao momento é fornecida pelo sistema (Melouk et al., 2012).

Em termos computacionais, a combinação das duas componentes ainda se encontra em desenvolvimento. No entanto são cada vez mais os pacotes que empregam extensões que incorporam as duas componentes (como é o caso do *ExtendSim*[®]). Estes pacotes informáticos recorrem, em geral, a um conjunto de meta heurísticas para encontrar soluções, nomeadamente ao método de superfície de resposta, à pesquisa aleatória, à pesquisa tabu, à otimização estocástica, aos algoritmos genéticos ou aos algoritmos evolutivos (Fu et al., 2014).

O *software* utilizado neste trabalho recorre a algoritmos evolutivos, em particular, algoritmos genéticos.

Os algoritmos evolutivos são baseados em populações nas quais se escolhem os melhores indivíduos como “pais” e é a partir destes que é formada a geração seguinte.

Por sua vez, os algoritmos genéticos iniciam-se através de um conjunto de soluções potenciais (em que cada uma corresponde a um indivíduo), o qual se denomina de população. Estas soluções são avaliadas por intermédio de uma função de avaliação, sendo que os melhores indivíduos têm uma maior probabilidade de se reproduzirem na geração de soluções seguintes. No decorrer do processo de reprodução, os novos indivíduos herdam características dos pais (geração anterior) através de um processo de cruzamento e são sujeitos a mutações e transformações. De seguida, são submetidos a diversos critérios de aceitação. A nova população de candidatos a solução vai ser formada apenas pelos elementos que observam aquelas condições. À medida que o algoritmo se desenvolve vai gerando soluções cada vez melhores, acabando eventualmente por convergir para uma população de soluções na vizinhança da solução ótima (Deng, 2007).

O facto de se tratar de variáveis aleatórias implica que exista uma probabilidade associada à seleção ótima dos parâmetros de entrada. A utilização destas técnicas implica que haja uma família de soluções (variáveis aleatórias) e não apenas uma única solução (Buchholz & Thümmler, 2005; Fu, 2002). As heurísticas (procedimentos que não asseguram a obtenção de soluções ótimas) devem, por isso, ser robustas e os algoritmos utilizados devem garantir que se conseguem obter soluções próximas do valor ótimo à medida que o número de iterações aumenta (Lopes, 2013, p. 154).

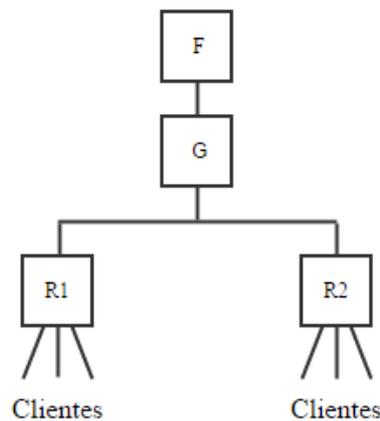
4. Cenários empíricos e modelação

4.1. Estrutura da cadeia de abastecimento

A parte empírica deste trabalho consistiu em construir um modelo de simulação suficientemente genérico que permitisse ensaiar a metodologia proposta anteriormente e testar a sensibilidade de uma cadeia de abastecimento às diferentes políticas de gestão de *stock* seguidas em cada nível.

A cadeia de abastecimento desenvolvida é constituída por um fabricante (F), um grossista (G) e dois retalhistas (R_1 e R_2), que por sua vez satisfazem a procura (aleatória) dos clientes finais. O gráfico sintético da cadeia de abastecimento é apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Estrutura da cadeia de abastecimento



Durante a construção do modelo foram tidos em conta alguns pressupostos: (1) a procura dos clientes finais é aleatória e caracterizada por uma distribuição Normal (220;28); (2) o grossista encomenda diretamente ao fabricante as quantidades que necessita, de acordo com a política seguida; (3) o grossista satisfaz diretamente a procura de cada retalhista, tendo por base as quantidades encomendadas por estes (retalhistas) e definidas pelas políticas de gestão de *stocks* adotada; (4) na situação de haver necessidade de produto por parte dos retalhistas, não se admitem transferências de

stock entre retalhistas; (5) não se considera a possibilidade de rutura ao nível do fabricante; (6) assume-se que as unidades em rutura são vendas perdidas e (7) os tempos de entrega de encomendas do fabricante ao grossista e deste aos retalhistas têm características específicas, de natureza aleatória.

Numa primeira fase foram consideradas duas políticas de gestão de *stocks*, as quais foram aplicadas de igual modo a grossistas e retalhistas.

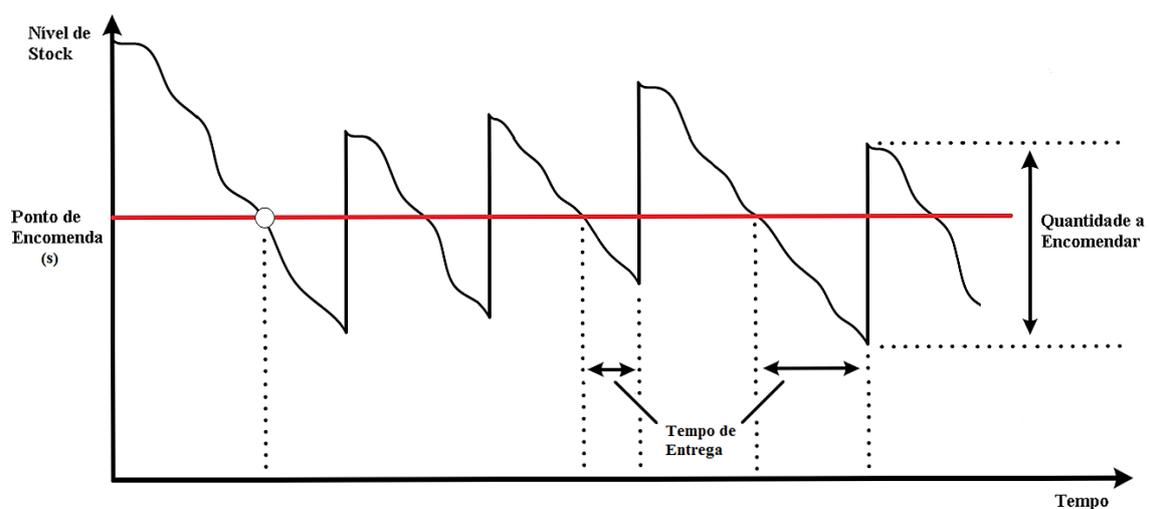
Tal como se referiu, optou-se por utilizar as políticas de ponto de encomenda e revisão cíclica, pois devido às suas características são as mais indicadas e utilizadas pela maioria dos autores que estudam problemas semelhantes nesta área.

Segue-se uma breve explicação do funcionamento de cada política.

4.2. Políticas de gestão de stocks

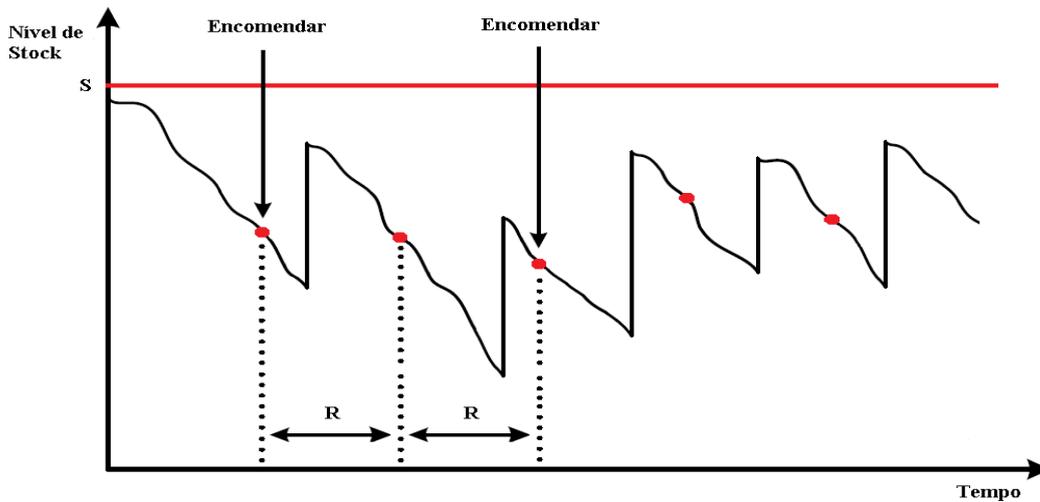
A política de ponto de encomenda fixa à partida o valor da quantidade a encomendar e , por isso, sempre que o valor do *stock* em mão atinge o ponto de encomenda s , efetua-se uma encomenda de Q unidades (constante).

Figura 3 – Política de ponto de encomenda



Na política de revisão cíclica, o tempo de revisão é constante, isto é, o intervalo de tempo entre encomendas sucessivas é constante e o que varia é a quantidade a encomendar. Assim observa-se o *stock* em mão de R em R unidades de tempo e encomenda-se a quantidade necessária para atingir um nível S prefixado.

Figura 4 – Política de revisão cíclica



Adaptado de Lopes & Matos, (2014)

É de salientar que não foi admitido *stock* de segurança inicial em nenhuma política e que, em ambas, os valores são obtidos através de algoritmos e meta heurísticas de forma a otimizar a função objetivo (que neste caso é minimizar os custos totais diários). Qualquer das políticas tem vantagens e desvantagens, originando diferenças sobretudo na dimensão do *stock* de segurança, na forma de monitorizar o *stock*, na flexibilidade e na complexidade em termos operacionais. Assim, cabe a cada gestor escolher a política que melhor se adapta às suas necessidades (Lopes & Matos, 2014).

Numa segunda fase, optou-se por testar uma variante do modelo de revisão cíclica (Variante RRR). Esta variante assume que o tempo de revisão é unitário (fixo), ou seja, verifica-se o *stock* em mão diariamente, o que difere do modelo inicial, onde se considera o tempo de revisão variável. A quantidade a encomendar é variável e limitada pelo nível de *stock* máximo, sendo assim, a única variável de decisão do modelo. Esta

política, de certa forma, harmoniza as duas anteriores, na medida em que observa o *stock* a cada instante (ponto de encomenda) e por outro lado encomenda uma quantidade variável, definida pela diferença entre o *stock* em mão e o nível de *stock* máximo S .

De seguida apresentam-se os modelos que foram alvo de estudo (Quadro 1). Estes modelos resultam de todas as combinações possíveis para as políticas utilizadas em cada nível da cadeia de abastecimento. Convém notar que, estando os retalhistas no mesmo nível, se se considerarem com políticas diferentes é indiferente qual o que assume a política de ponto de encomenda (retalhista 1 ou 2) e qual o que assume a política de revisão cíclica (retalhista 1 ou 2).

Quadro 1 – Políticas de gestão de stocks nos diferentes níveis da cadeia de abastecimento

Modelo	Grossista (G)	Retalhista 1 (R₁)	Retalhista 2 (R₂)
1	P	P	P
2	P	P	R
3	P	R	R
4	R	P	R
5	R	P	P
6	R	R	R
P = Ponto de Encomenda		R = Revisão Cíclica	

No ponto seguinte são especificados os parâmetros de *input* do modelo de simulação que definem o cenário base, bem como as distribuições estatísticas assumidas para as variáveis aleatórias.

4.3. Definição de parâmetros

A experiência realizada tem por base a análise de um produto durável, com uma elevada taxa de rotação, pois este apresenta um elevado consumo.

O cenário base parte de um produto com um preço unitário de 100 unidades monetárias (u.m), que apresenta uma procura diária ao nível dos clientes que segue uma

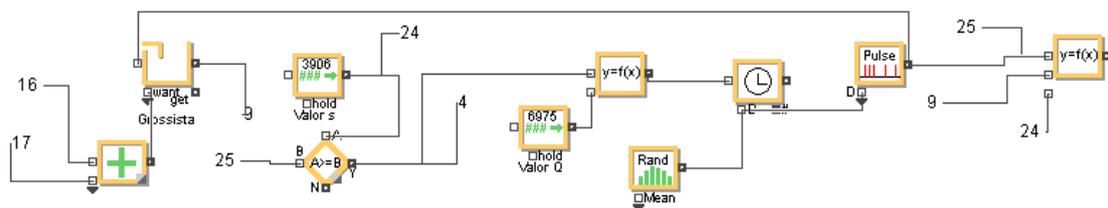
distribuição normal de média 220 unidades e um desvio padrão de 28 unidades. O tempo de entrega de encomenda entre o grossista e o retalhista segue uma distribuição normal, de média 5 dias e desvio padrão 1 dia. No entanto, quando se trata da ligação entre o grossista e o fabricante estes valores reduzem-se para metade, ou seja, média 2.5 dias e desvio padrão 0.5 dias. Admite-se ainda um tempo interno de encomenda (este período está relacionado com a parte administrativa e é utilizado, por exemplo, para consolidar encomendas ou preparar um pedido), fixo e igual a 1 dia. O custo fixo de encomenda foi estabelecido em 3 u.m/encomenda e o custo fixo de encomenda e revisão em 3.1 u.m/ (encomenda + revisão). A taxa de manutenção anual foi calculada com base no estudo apresentado por Muckstadt (Muckstadt & Sapra, 2010), tendo esta um valor médio de 22.5%. A estimativa do custo de rutura por unidade em falta foi baseada na metodologia desenvolvida por Anderson (Anderson et al., 2006). Assim, admite-se um impacto a curto e a médio prazo na venda do produto e em encomendas futuras, assumindo um valor de 0.29 u.m/unidade em falta.dia (unidades monetárias por unidade em falta e dia). De forma a ser possível realizar uma análise mais aprofundada do impacto dos custos, admitem-se mais dois patamares para os custos de rutura, com o valor de 0.13 e 0.09.

Convém referir que os valores utilizados para os parâmetros base, foram definidos arbitrariamente, mas de forma a serem coerentes entre si. Salienta-se ainda que o produto apresenta as características genéricas de um *item* de tipo B da classe “*fast moving item*”, definida por Pareto. Este é um item intermédio, que representa 30% do total de itens de uma organização.

O Quadro 2 sintetiza as particularidades mais importantes dos parâmetros base da experimentação.

Na Figura 5 está representado o esquema do grossista quando este opera através da política de ponto de encomenda. Em primeiro lugar verifica-se se existe a necessidade de realizar uma encomenda e, para isso, compara-se o valor do *stock* em mão com o valor de s , no bloco *Decision*. Caso o valor do *stock* seja inferior a s , o bloco emite o valor 1, que significa que se vai efetuar uma encomenda, em caso contrário assume o valor 0. No bloco seguinte (*Equation*), verifica-se qual foi o valor assumido pelo bloco anterior (*Decision*), caso seja 1, efetua-se uma encomenda de Q unidades, caso contrário não se concretiza nenhuma ação. Segue-se o bloco *Wait Time*. Aqui é feito o processamento da encomenda de acordo com a distribuição assumida para o tempo de entrega, neste caso uma Normal (2.5;0.5). O bloco *Pulse* irá verificar quando a encomenda é efetivamente recebida, assumindo o valor 1 quando esta for entregue; analisa-se novamente o nível de *stock* para averiguar se existe necessidade de fazer um outro pedido. No caso do pedido ainda não ter sido satisfeito, o valor é 0 e o bloco *Equation* vai assumir o valor de $s + 1$, pois uma vez que o sistema é contínuo tem de se acrescentar uma unidade para que este não concretize outra encomenda. Quando esta é recebida passa para o bloco *Holding Tank* que armazena o *stock* do grossista e o processo repete-se.

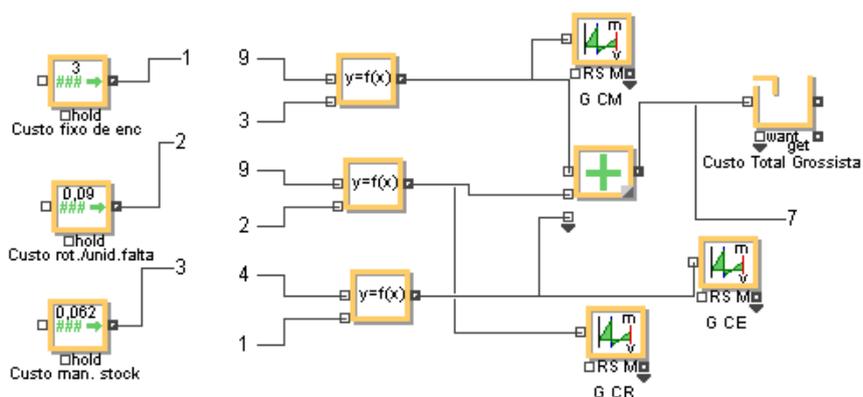
Figura 6 – Política de revisão cíclica no grossista



O esquema apresentado na Figura 6 inicia-se pelo bloco *Pulse*, que de R em R unidades de tempo emite uma ordem para que seja analisado o nível de *stock* existente. O bloco *Equation* com base no *output* dado pelo bloco anterior vai verificar se existe

necessidade de se efetuar uma encomenda. Deste modo, é preciso verificarem-se duas condições. Em primeiro lugar, verifica-se se o valor proveniente do bloco *Pulse* é igual a 1, ou seja, se foi dada ordem de compra; em segundo lugar, caso o *stock* existente seja superior a *S* não se encomenda e, se o *stock* for inferior a *S*, então pede-se a quantidade em falta até se atingir *S*. Segue-se o bloco *Wait Time* que, de acordo com a distribuição definida para o tempo de entrega, neste caso Normal (2.5;0.5), vai efetuar o processamento da encomenda. Quando esta é rececionada é enviada para o bloco *Holding Tank*, onde é armazenado o *stock* do grossista.

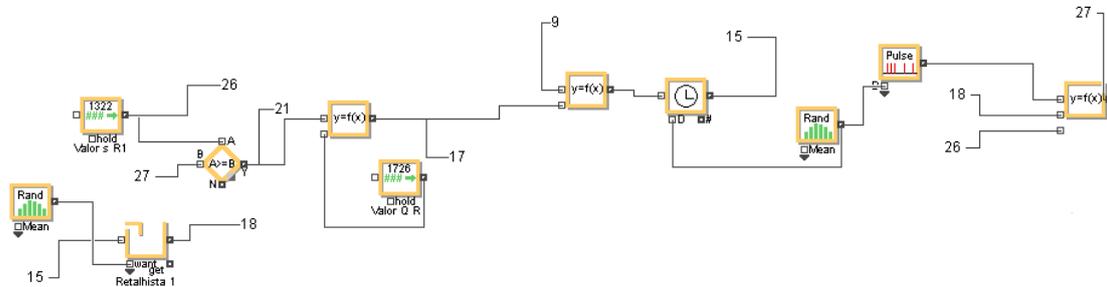
Figura 7 – Custos aos níveis do grossista e retalhista



A Figura 7 mostra como são definidos os custos base (fixo, de rutura e manutenção) que são inseridos no bloco *Constant*. Estes valores por sua vez entraram no bloco *Equation*. No caso do custo fixo de encomenda, sempre que se efetue um pedido ele é adicionado ao custo total do retalhista/grossista. Quanto ao custo de rutura, caso exista rutura este custo unitário é multiplicado pelo número de unidades em falta (simétrico do valor negativo obtido pelo modelo); caso não haja rutura, o custo é nulo. O custo de manutenção é obtido multiplicando o custo unitário pela quantidade existente em *stock*. De seguida, basta adicionar os três custos através do bloco *Math*. Foi

também inserido o bloco *Mean & Variance* de modo a possibilitar uma análise mais pormenorizada de cada um dos custos.

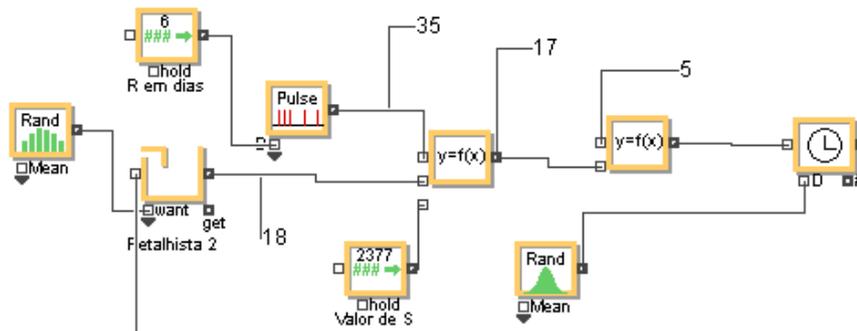
Figura 8 – Política de ponto de encomenda nos retalhistas



No retalhista (Figura 8) o processo é muito semelhante ao que ocorre no grossista. Regista-se apenas uma alteração antes de se chegar ao bloco *Wait Time*, pois é inserido outro bloco *Equation* para analisar a quantidade de *stock* existente no grossista. Aqui são comparadas as quantidades a encomendar com o *stock* existente, caso o *stock* consiga satisfazer a procura (quantidades a encomendar) então o grossista fornece essa mesma quantidade. Na situação em que o *stock* é inferior à quantidade necessária mas existe algum *stock* em mão, é fornecida apenas a quantidade existente. Na circunstância de não haver *stock*, não existe qualquer abastecimento. O restante funcionamento do sistema é idêntico ao do grossista.

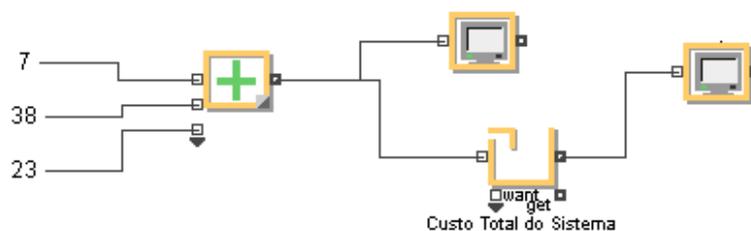
Convém salientar que a distribuição do tempo médio de entrega neste nível segue uma Normal (5;1) e que as quantidades a encomendar, embora sejam fixas, têm em conta a procura dos clientes, que é dada por uma Normal (220;28).

Figura 9 – Política de revisão cíclica no retalhista



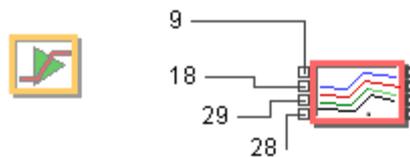
À semelhança do que acontece na política de ponto de encomenda, também aqui (Figura 9) o procedimento é idêntico ao do grossista, sofrendo apenas alterações depois do bloco *Pulse*. O primeiro bloco *Equation* verifica a necessidade de se efetuar uma encomenda e em que quantidades. No segundo bloco *Equation* é analisado o *stock* existente no grossista; aqui compara-se o *stock* em mão com a quantidade a encomendar de forma a averiguar se é necessário efetuar uma nova encomenda e se o *stock* existente consegue satisfazer essa procura. No caso de o *stock* ser superior à quantidade necessária, então é fornecida essa quantidade; na situação em que o *stock* em mão não é suficiente mas ainda assim existe algum produto, será apenas disponibilizada a quantidade existente. Quando não existe *stock*, nada é fornecido. O restante sistema funciona de modo idêntico ao do grossista. Salienta-se apenas que o tempo médio de entrega neste nível segue uma distribuição Normal (5;1) e que as quantidades a encomendar têm em consideração a procura dos clientes, que é dada por uma distribuição Normal (220;28).

Figura 10 – Custos totais do sistema



Os blocos apresentados na Figura 10 permitem determinar os custos totais do sistema. As variáveis de entrada correspondem aos custos provenientes do grossista e de cada um dos retalhistas, sendo acumulados e disponibilizados através dos blocos *Math*, *Holding Tank* e *Display*, respetivamente.

Figura 11 – Blocos *Optimizer* e *Plotter*



O bloco *Optimizer* (Figura 11, lado esquerdo) foi incluído em todos os modelos de forma a encontrar a melhor combinação de parâmetros, utilizando o critério de minimização do custo total do sistema. Este bloco emprega meta heurísticas semelhantes às descritas no ponto 3 e detalhadas em Zvirgzdina & Tolujevs (2013). Importa referir que foram definidos intervalos de amplitude suficientemente ampla para as variações registadas nas variáveis de decisão, de modo a não representarem qualquer restrição aquando da sua estimação.

No bloco *Plotter* (Figura 11, lado direito) agregam-se as variáveis mais importantes do modelo, e disponibilizam-se os resultados em tabelas e gráficos, de forma a facilitar uma futura análise de resultados.

Convém ainda referir as seguintes particularidades e pressupostos de funcionamento dos modelos: (1) uma vez que se trata de uma simulação contínua, apenas foi necessário utilizar blocos da biblioteca *Value* e *Plotter*; (2) na definição da dimensão das amostras não foi tido em conta o tempo de computação, uma vez que este não foi um fator restritivo durante toda a experimentação; (3) cada otimização foi desenvolvida com uma dimensão igual a 500 dias; (4) em termos computacionais, na

formulação da política de ponto de encomenda, assumiu-se que apenas se observa o *stock* em mão depois de ser recebida a encomenda anterior. Desta forma, evita-se acumulação de pedidos enquanto a encomenda não é recebida. Este pressuposto é normalmente assumido neste tipo de experimentações e tem consistência com a operacionalidade real.

Na fase de otimização foi considerada uma população de soluções de tamanho 10, sendo 100 o número máximo de réplicas para se considerar uma solução. A conclusão da otimização está sujeita a dois critérios de paragem: quando o grau de convergência entre a população de soluções é superior a 99.5% (corresponde à proximidade de cada indivíduo da população) ou quando se completem 1000 gerações (opção *better defaults*).

Na fase de simulação foi realizada uma análise de sensibilidade aos custos de rutura para os três patamares, respetivamente iguais a 0.29 u.m/unidade em falta.dia (cerca de cinco vezes o custo de manutenção); 0.13 u.m/unidade em falta.dia (cerca do dobro do custo de manutenção) e 0.09 u.m/unidade em falta.dia (cerca de uma vez e meia superior ao custo de manutenção).

Procedeu-se, assim, ao cálculo dos custos totais diários de cada modelo, diferenciados por custos de rutura, através de amostras com dimensão igual a 10^4 dias. Excluiu-se desde valor um período inicial (*warm-up period*) estabelecido através de observação gráfica, em 10^2 dias. Com este valor (para a amostra), torna-se admissível realizar comparações diretas dos resultados, uma vez que a variância dos estimadores é muito reduzida. Este é o procedimento seguido, em geral, por Rinott (Rinott, 1978).

5. Análise de resultados

Conforme referido anteriormente, a utilização da simulação e otimização tem como objetivo a definição de políticas de gestão de *stocks* que permitam minimizar o custo total de funcionamento do sistema. Para tal, utilizou-se o bloco *Optimizer* nas estruturas desenvolvidas e para os três patamares considerados para os custos de rutura (0.09; 0.13; 0.29). Os resultados obtidos para as variáveis de decisão são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Resultados da otimização (para 500 dias)

Estrutura da Cadeia	Custo de Rutura (u.m/unidade em falta.dia)								
	0.09			0.13			0.29		
	Convergência (%)	Valor Médio	Parâmetros	Convergência (%)	Valor Médio	Parâmetros	Convergência (%)	Valor Médio	Parâmetros
PRR	99.31	234347.86	sG : 4383	98.79	273049.88	sG : 3961	98.02	332512.58	sG : 4416
			QG : 5484			QG : 7508			QG : 8640
			SR ₁ : 649			SR ₁ : 2392			SR ₁ : 743
			RR ₁ : 3			RR ₁ : 7			RR ₁ : 1
			SR ₂ : 218			SR ₂ : 165			SR ₂ : 1876
			RR ₂ : 3			RR ₂ : 1			RR ₂ : 5
PPR	95.41	243561.55	sG : 3906	99.20	249980.65	sG : 4185	98.83	302934.34	sG : 3706
			QG : 6975			QG : 5791			QG : 7468
			sR ₁ : 1322			sR ₁ : 1458			sR ₁ : 1603
			QR ₁ : 1726			QR ₁ : 1593			QR ₁ : 1682
			SR ₂ : 2377			SR ₂ : 1528			SR ₂ : 2496
			RR ₂ : 6			RR ₂ : 5			RR ₂ : 7
PPP	98.74	224474.45	sG : 3326	98.87	228843.25	sG : 4052	98.89	286118.38	sG : 3570
			QG : 5540			QG : 4124			QG : 5675
			sR ₁ : 794			sR ₁ : 1524			sR ₁ : 1969
			QR ₁ : 2128			QR ₁ : 1667			QR ₁ : 1955
			sR ₂ : 1500			sR ₂ : 1223			sR ₂ : 1948
			QR ₂ : 1856			QR ₂ : 1826			QR ₂ : 1944
Variante RRR	98.02	174467.86	SG : 3883	98.54	202567.67	SG : 3873	99.55	247662.82	SG : 4457
			SR ₁ : 412			SR ₁ : 455			SR ₁ : 896
			SR ₂ : 1			SR ₂ : 1			SR ₂ : 418
RPP	98.24	172106.63	SG : 4612	99.53	189391.89	SG : 4558	99.51	222370.08	SG : 4412
			RG : 2			RG : 1			RG : 1
			sR ₁ : 1054			sR ₁ : 1290			sR ₁ : 1583
			QR ₁ : 1601			QR ₁ : 1831			QR ₁ : 1607
			sR ₂ : 1214			sR ₂ : 1030			sR ₂ : 1696
			QR ₂ : 1504			QR ₂ : 1808			QR ₂ : 1615
RPR	99.53	160440.96	SG : 4319	99.30	176217.24	SG : 4246	99.52	209087.78	SG : 4655
			RG : 1			RG : 1			RG : 1
			sR ₁ : 988			sR ₁ : 965			sR ₁ : 1650
			QR ₁ : 1646			QR ₁ : 2161			QR ₁ : 1848
			SR ₂ : 1149			SR ₂ : 2205			SR ₂ : 2662
			RR ₂ : 4			RR ₂ : 6			RR ₂ : 7
RRR	99.56	151603.01	SG : 4389	99.11	147390.56	SG : 3749	99.51	184878.32	SG : 4592
			RG : 1			RG : 1			RG : 1
			SR ₁ : 909			SR ₁ : 1772			SR ₁ : 1344
			RR ₁ : 3			RR ₁ : 5			RR ₁ : 3
			SR ₂ : 2115			SR ₂ : 914			SR ₂ : 2077
			RR ₂ : 7			RR ₂ : 2			RR ₂ : 5

É de salientar que a grande maioria dos modelos não atingiu o grau de convergência preestabelecido (99.5%). De facto apenas sete, num total de vinte e uma experiências concretizadas, atingiram este valor. No entanto, todos se situaram acima dos 95% (*quicker defaults*), o que neste tipo de análise se pode considerar aceitável.

De um modo geral, as estruturas que utilizam a política de revisão cíclica no grossista apresentam valores de custos médios significativamente inferiores aos registados quando a política seguida ao nível do grossista é o ponto de encomenda. Esta conclusão já tinha sido evidenciada pela investigação realizada por Lopes & Matos (2014).

Da análise do Quadro 3 torna-se também evidente que o nível do grossista é aquele que exerce maior influência na variação nos valores médios dos custos totais, uma vez que os melhores resultados para cada política (seguida no grossista) se obtêm quando toda a estrutura segue o mesmo procedimento. Ou seja, quantos mais níveis divergirem da política do grossista, pior é o valor do custo total.

Torna-se ainda patente uma maior estabilidade paramétrica ao nível dos grossistas apresentada pelas políticas de revisão cíclica, quando comparadas com as de ponto de encomenda. Isto deve-se ao facto de existir uma maior concentração de procura neste nível da cadeia, o que conduz a valores menores da variabilidade desta variável. Esta estabilidade verifica-se mesmo quando se registam alterações aos custos de rutura, podendo-se concluir que os modelos de revisão cíclica são mais robustos e não tão sensíveis a variações da procura.

Nos modelos que utilizam revisão cíclica no grossista verifica-se também que na generalidade dos casos o tempo de revisão no grossista é unitário, ou seja, observa-se o

nível de *stock* diariamente. Esta constatação está alinhada com o facto de as estruturas evitarem a rutura ao nível do grossista, como se verá mais adiante.

Com base nas conclusões anteriores, optou-se por formular e otimizar um sistema adicional que é uma variante do modelo RRR, na tentativa de verificar o que aconteceria se todos os níveis realizassem uma revisão diária. Embora se esperasse que os resultados obtidos fossem melhores, tal não se verificou, apresentando este modelo resultados intermédios (entre os modelos que utilizam ponto de encomenda no grossista e os que empregam revisão cíclica).

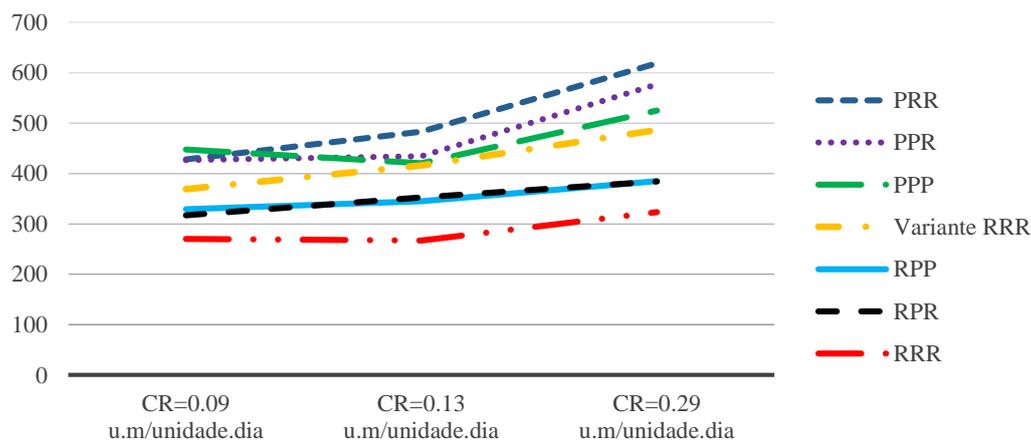
De modo a aprofundar a análise efetuada, realizou-se uma análise de sensibilidade aos resultados obtidos através de uma simulação de 10^4 dias para todas as estruturas ensaiadas, admitindo-se os parâmetros encontrados na fase de otimização. Foi considerado um período de aquecimento (*warm-up period*) de 10^2 dias, sendo este identificado visualmente. Este período foi retirado do cálculo do valor médio dos custos diários de cada modelo, uma vez que nele se registam oscilações significativas. O intervalo de confiança foi fixado em 95%. Os resultados são apresentados no Quadro 4 e nos Gráficos 1 e 2.

Quadro 4 – Intervalos de confiança (95%) para o valor médio diário dos custos nas várias estruturas da cadeia de abastecimento

Estrutura da Cadeia	Custo de Rutura (u.m./unidade em falta.dia)		
	0.09	0.13	0.29
PRR	428.08 ± 2.47	482.98 ± 3.36	618.95 ± 4.26
PPR	426.87 ± 3.38	434.49 ± 2.87	577.17 ± 5.10
PPP	447.72 ± 4.00	420.72 ± 3.37	524.81 ± 4.38
Variante RRR	369.36 ± 2.16	416.17 ± 2.22	486.06 ± 2.39
RPP	329.08 ± 2.26	345.29 ± 2.53	384.93 ± 3.39
RPR	317.02 ± 1.59	352.74 ± 2.42	384.47 ± 2.43
RRR	269.96 ± 0.88	266.87 ± 1.55	323.65 ± 1.22

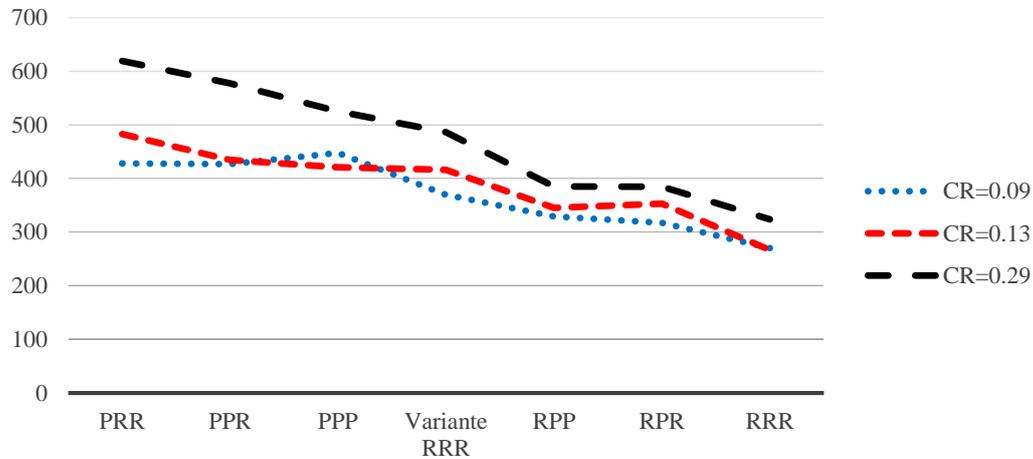
Estes resultados mostram que as políticas são sensíveis às variações realizadas nos custos de rutura e que, à medida que estes aumentam, os custos totais também registam valores mais elevados. Parece, por isso, existir uma correlação positiva entre as duas variáveis, embora só uma análise estatística o permitisse concluir (os resultados anteriores são corroborados pelos obtidos na simulação). Tornam-se assim mais evidentes as conclusões obtidas anteriormente, nomeadamente o facto de as estruturas que utilizam a política de revisão cíclica no grossista apresentarem custos menos elevados e a existência de uma maior sensibilidade, em geral, à alteração do custo de rutura para as estruturas que utilizam o ponto de encomenda no grossista.

Gráfico 1 – Custos totais diários em função dos custos de rutura para as várias estruturas da cadeia de abastecimento



Os resultados anteriores poderão encontrar explicação na natureza operacional de cada uma das políticas, já que na política de revisão cíclica se realizam apenas encomendas de R em R períodos e de acordo com o *stock* em mão existente. Existe, assim, um período em que o decisor não pode tomar qualquer decisão, ao contrário do que acontece com a política de ponto de encomenda, onde a observação do *stock* em mão é contínua e a quantidade a encomendar é constante, tornando a política demasiado sensível, e incrementando desnecessariamente os *stocks* de segurança.

Gráfico 2 – Custos totais diários em função das estruturas de cadeia de abastecimento para os vários custos de rutura



Pela observação do Gráfico 2, verifica-se que as políticas com custo de 0.29 são as que registam custos mais elevados e que os outros dois patamares apresentam valores muito idênticos.

No âmbito de concretizar uma análise mais minuciosa, realizou-se uma simulação onde se discriminaram os custos mais relevantes em cada nível (neste caso o custo de rutura (CR) e o custo de manutenção (CM)). Foram novamente simuladas todas as estruturas para uma dimensão de 10^4 dias, retirando-se o período de aquecimento de 10^2 dias.

Analisando o Quadro 5, conclui-se que os custos de manutenção são os que têm maior impacto no custo total, principalmente ao nível do grossista.

Os custos de rutura, por sua vez, são mais significativos nos retalhistas, pois as estruturas evitam ter rutura ao nível dos grossistas uma vez que, caso isto aconteça, o sistema entra em colapso e nunca mais recupera, como foi verificado anteriormente.

Quadro 5 – Discriminação de custos por natureza para as várias estruturas da cadeia de abastecimento

		C.Rutura 0.09		C.Rutura 0.13		C.Rutura 0.29	
		Média		Média		Média	
		CR	CM	CR	CM	CR	CM
PRR	G	0.05 ± 0.03	383.39 ± 3.35	0.54 ± 0.14	365.84 ± 3.38	1.99 ± 0.51	431.53 ± 3.82
	R ₁	38.19 ± 0.72	5.00 ± 0.22	32.50 ± 0.99	15.13 ± 0.38	46.92 ± 1.74	83.46 ± 1.58
	R ₂	40.83 ± 0.79	6.01 ± 0.25	56.85 ± 1.25	17.85 ± 0.53	53.63 ± 1.49	10.15 ± 0.26
PPR	G	1.24 ± 0.38	434.33 ± 4.69	0.03 ± 0.04	324.84 ± 2.56	0.11 ± 0.05	419.99 ± 4.27
	R ₁	32.37 ± 1.70	53.68 ± 0.97	13.85 ± 0.66	38.14 ± 0.73	14.47 ± 0.62	44.12 ± 0.91
	R ₂	14.14 ± 1.45	48.19 ± 0.65	50.39 ± 0.89	2.37 ± 0.10	6.50 ± 0.33	26.19 ± 0.47
PPP	G	2.96 ± 0.38	303.80 ± 3.78	0.45 ± 0.15	253.35 ± 2.22	3.59 ± 0.77	328.35 ± 3.66
	R ₁	43.38 ± 1.25	29.97 ± 0.87	12.06 ± 0.69	45.75 ± 0.74	21.88 ± 1.84	69.23 ± 0.95
	R ₂	27.42 ± 1.09	43.34 ± 0.97	25.67 ± 1.02	42.62 ± 0.92	21.76 ± 1.75	75.00 ± 0.97
Variante RRR	G	0.01 ± 0.01	182.26 ± 1.35	0.16 ± 0.09	181.79 ± 1.36	7.08 ± 0.89	263.91 ± 2.36
	R ₁	26.12 ± 0.70	29.40 ± 0.69	24.10 ± 0.74	38.92 ± 0.81	23.48 ± 1.00	54.57 ± 1.08
	R ₂	45.99 ± 0.99	16.85 ± 0.49	66.77 ± 1.44	16.51 ± 0.49	81.85 ± 2.49	53.29 ± 1.25
RPP	G	0.42 ± 0.14	210.83 ± 1.70	0.02 ± 0.03	257.83 ± 1.96	0.04 ± 0.03	172.60 ± 1.38
	R ₁	36.28 ± 1.80	36.81 ± 0.68	19.15 ± 0.77	37.19 ± 0.81	26.73 ± 0.76	18.42 ± 0.54
	R ₂	40.93 ± 2.11	38.48 ± 0.72	31.46 ± 1.00	26.49 ± 0.69	27.58 ± 0.83	19.85 ± 0.56
RPR	G	0.14 ± 0.09	224.81 ± 1.70	0.02 ± 0.03	235.73 ± 1.81	0.01 ± 0.01	209.70 ± 1.43
	R ₁	18.08 ± 1.11	64.19 ± 1.03	31.82 ± 1.13	44.58 ± 1.02	23.85 ± 0.71	20.73 ± 0.57
	R ₂	19.70 ± 1.04	33.15 ± 0.57	31.51 ± 0.82	10.87 ± 0.30	6.38 ± 0.28	20.03 ± 0.39
RRR	G	0.09 ± 0.07	294.93 ± 2.51	1.00 ± 0.17	166.56 ± 1.23	5.64 ± 0.61	167.99 ± 1.87
	R ₁	18.98 ± 0.99	24.24 ± 0.46	14.67 ± 0.44	14.26 ± 0.32	31.65 ± 0.63	4.27 ± 0.20
	R ₂	0.69 ± 0.19	80.05 ± 0.68	23.56 ± 0.78	33.40 ± 0.74	46.94 ± 1.04	13.21 ± 0.48

Também aqui se constata uma correlação positiva entre os custos de manutenção e os de rutura. Por sua vez as políticas de revisão cíclica no grossista, conduzem a valores dos custos de manutenção inferiores aos registados quando o procedimento é o ponto de encomenda. Por fim os custos fixos de encomenda têm valores marginais, não tendo grande impacto nos custos totais.

6. Conclusões

O presente trabalho propôs criar um percurso metodológico para a análise de diferentes políticas de gestão de *stock* ao longo de vários níveis de uma cadeia de abastecimento multinível. Para alcançar este objetivo, foi desenvolvido um modelo que representa uma cadeia de abastecimento com quatro níveis, em ambiente *ExtendSim 8*[®].

O modelo desenvolvido foi simulado e os resultados otimizados com recurso a algoritmos genéticos e evolutivos, tendo por base variáveis de *input* que representam

um produto durável de elevada rotação. Importa salientar que os resultados e conclusões obtidas são específicos para um bem com estas características (e com estes valores para as variáveis de *input*).

Em primeiro lugar, convém referir que apenas 7 dos 21 (33.(3) %) modelos otimizados atingiram o grau de convergência estabelecido em 99.5%.

A principal conclusão é que a estrutura que conduz a melhores resultados (minimização dos custos totais do sistema) é aquela em que a política de revisão cíclica é aplicada em todos os níveis da cadeia.

Outro resultado interessante é o facto de os melhores resultados para cada política (seguida pelo grossista) serem obtidos quando toda a estrutura observa procedimentos idênticos. Torna-se assim evidente que o nível do grossista é o que tem mais impacto sobre os custos totais, o que faz sentido, uma vez que este nível é o que regista uma maior concentração de procura.

De um modo geral, à medida que os níveis seguintes vão seguindo políticas diferentes da do grossista, os custos totais têm tendência a aumentar.

Na simulação, os resultados obtidos são coerentes com os registados na fase de otimização. Verifica-se que a maioria dos custos está concentrada ao nível dos grossistas, sendo os custos de manutenção os mais significativos. A análise de sensibilidade realizada aos custos de rutura parece indicar, como se esperava, que existe uma correlação positiva entre este parâmetro e o custo total, podendo-se concluir que as estruturas são sensíveis a variações nestes custos e que, à medida que aumenta o custo total prossegue essa tendência. A rutura regista-se sobretudo ao nível dos retalhistas, uma vez que os grossistas evitam-na definitivamente, pois sempre que se registou rutura o sistema entrou em perda total e não conseguiu recuperar. Quanto aos custos fixos de

encomenda, estes não mostraram ter grande impacto no custo total das estruturas, uma vez que os valores registados foram marginais.

Como foi referido na parte das hipóteses dos modelos, estes possuem algumas limitações, nomeadamente o facto de não se assumir a troca de *stocks* entre retalhistas e de se admitir que, na política de ponto de encomenda, o *stock* em mão só é observado depois de ser recebida a encomenda. Saliente-se, no entanto, que esta é a prática correntemente utilizada. Outra limitação que pode vir a ser ultrapassada em desenvolvimentos futuros, é a dimensão das soluções e gerações assumidas para se considerar uma solução, relaxando estes critérios.

Refira-se para terminar que, neste trabalho o número de níveis considerados na cadeia de abastecimento é relativamente reduzido e as características do produto analisado são particulares. No entanto, a metodologia usada para a obtenção de políticas de gestão de *stock* em cadeias de abastecimento poderá ser generalizada com relativa facilidade a outro tipo de produto ou estrutura.

7. Bibliografia

- Akkermans, H.A., Bogerd, P., Yücesan, E. e van Wassenhove, L.N. (2003). The impact of ERP on supply chain management: Exploratory findings from a European Delphi study. *European Journal of Operational Research*, Vol. 146, No. 2. p. 284-301.
- Anderson, E.T., Fitzsimons, G.J. e Simester, D. (2006). Measuring and Mitigating the Costs of Stockouts. *Management Science*, Vol. 52, No. 11. p. 1751-1763.
- Barroso, Jorge (2012). Gestão de Materiais numa empresa da área de reabilitação energética de edifícios Openline S.A. Tese de Mestrado. Universidade do Minho.
- Batista, A. e Lopes, J. (2015). Metodologia Integrada para Avaliação de Políticas de Gestão de Stocks em Cadeias de Abastecimento Utilizando Simulação. *Lusíada, Economia & Empresa*. Lisboa, nº 19. p. 133-158.
- Beamon, Benita M. (1998), Supply chain design and analysis: Models and methods. *International Journal of Production Economics*, Vol. 55, Iss. 3. p. 281-294.
- Bertrand, J. Will M. e Fransoo, Jan C. (2002). Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 22, Iss. 2. p. 241-264.
- Bottani, Eleonora e Montanari, Roberto. (2010). Supply chain design and cost analysis through simulation. *International Journal of Production Research*, Vol. 48, No. 10. p. 2859-2886.
- Bottani, Eleonora, Ferretti, Gino, Montanari, Roberto, Vignali, Giuseppe, Longo, Francesco e Bruzzone, Agostino. (2013). Design of supply networks with optimized safety stock levels. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 5, No. 2. p. 93-109.

- Buchholz, Peter e Thümmler, Axel. (2005). Enhancing Evolutionary Algorithms with Statistical Selection Procedures for Simulation Optimization. Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. p. 842-852
- Chan, Felix T.S. e Chan, H.K. (2005). Simulation modeling for comparative evaluation of supply chain management strategies. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 25. p. 998-1006.
- Cheng, Chen-Yang, Chen, Tzu-Li e Chen, Yin-Yann. (2014). An analysis of the structural complexity of supply chain networks. Applied Mathematical Modelling, Vol. 33. p. 2328-2344.
- Chopra, Sunil e Meindl, Peter. (2007). Supply chain management. Upper Saddle River, Pearson Prentice Hall.
- Daniel, J. Sudhir Ryan e Rajendran, Chandrasekharan. (2005). A simulation-based genetic algorithmic for inventory optimization in a serial supply chain. International Transactions in Operational Research, Vol. 12, Iss.1. p. 101-127.
- Dellino, Gabriella, Meloni, Carlo e Pierreval, Henri. (2014). Simulation-optimization of complex systems: Methods and applications. Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 46. p. 1-3.
- Deng, Geng. (2007). Simulation-Based Optimization. Doctor of Philosophy Thesis. University of Wisconsin-Madison, U.S.A.
- ExtendSim User Guide. (2007). Imagine That.
- Fleischmann, Moritz, Bloemhof-Ruwaard, Jacqueline M., Dekker, Rommert, van der Laan, Erwin, van Nunen, Jo A.E.E. e Wassenhove, Luk N. Van. (1997). Quantitative models for reverse logistics: A review. European Journal of Operational Research, Vol. 103, Iss. 1. p. 1-17.

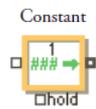
- Fu, M. (2014). Handbook of Simulation Optimization. Springer.
- Fu, M.C. (2002). Optimization for Simulation: Theory vs. Practice. Journal on Computing, Vol. 14, No. 3. p. 192-215.
- Fu, Michael C., Bayraksan, Guzin, Henderson, Shane G., Nelson, Barry L., Powell, Warren B., Ryzhov, Ilya O. e Thengvall, Ben. (2014). Simulation Optimization: A panel on the State of the Art in research and practice. Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. p. 3696-3706.
- Ganeshan, Ram., Jack, Eric., Magazine, Michael J. e Stephens, Paul. (1999). A Taxonomic Review of Supply Chain Management Research. Quantitative Models for Supply Chain Management. Kluwer Academic Publishers. p. 840-856.
- Ingalls, R.G. (1998). The Value of Simulation in Modeling Supply Chains. Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, Vol. 2. p. 1371-1375.
- Kopytov, Eugene e Muravjovs, Aivars. (2011). Simulation of Inventory Control System for Supply Chain "Producer-Wholesaler-Client" in ExtendSim Environment. Proceedings 25th European Conference on Modelling and Simulation. p. 580-586.
- Law, Averill M. (2003). How to Conduct a Successful Simulation Study. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference. p. 66-70
- Lee, Hau L., Padmanabhan, V. e Whang, Seungjin. (1997). The Bullwhip Effect In Supply Chains. Sloan Management Review, Vol. 38, Iss. 3. p. 93-102.
- Long, Qingqi e Zhang, Wenyu. (2014). An integrated framework for agent based inventory-production-transportation modeling and distributed simulation of supply chains. Information Sciences, Vol. 277. p. 567-581.

- Longo, Francesco e Mirabelli, Giovanni. (2008). An advanced supply chain management tool based on modeling and simulation. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 54, Iss. 3. p. 570-588.
- Lopes, J. (2013). *Simulação Discreta de Sistemas de Gestão*. Monitor.
- Lopes, J. e Matos, J. (2014), Heurísticas em Gestão de Stocks: Evidências Empíricas de Operação. *Lusíada Economia & Empresa*. Lisboa. Vol. 18. p. 137-161.
- Maguire, J.N. (1972). *Discrete Computer Simulation - Technology and Applications - The Next Ten Years*. *Proceedings of the Spring Joint Computer Conference*. p. 815-826.
- Melouk, Sharif H., Freeman, Nickolas K., Miller, David e Dunning, Michelle. (2012). Simulation optimization-based decision support tool for steel manufacturing. *International Journal Production Economics*, Vol. 141, Iss. 1. p. 269-276.
- Min, Hokey e Zhou, Gengui. (2002). Supply chain modeling: past, present and future. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 43, Iss. 1-2. p. 231-249.
- Muckstadt, J.A. e Sapra, A. (2010). *Principles of Inventory Management: When You Are Down to Four, Order More*. Springer Series in Operations Research and Financial Engineering.
- Ólafsson, Sigurdur e Kim, Jumi. (2002). Simulation Optimization. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*. p. 79-85.
- Pidd, M. (1996). *Tools for Thinking: Modeling in Management Science*. John Wiley & Sons.
- Rinott, Y. (1978). On two-stage selection procedures and related probability-inequalities. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, Vol. 7, Iss. 8. p. 799-811.

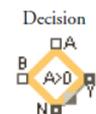
- Seco, Alexandra e Vieira, Carlos. (2014). A multi-agent supply chain simulation analysis through a statistical mixed model. *International Conference on Health and Social Care Information Systems and Technologies*, Vol. 16. p. 163-171.
- Shalliker, J. e Suleman, A. (2012). *Guia de Simulação Discreta por Computador usando Simul8*.
- Sherbrooke, Craig C. (1968). Metric: A Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control. *Operations Research*, Vol. 16, No. 1. p. 122-141.
- Silver, Edward A, Pyke, D. F, Peterson, Rein. (1998). *Inventory management and production planning and scheduling*. New York. Wiley.
- Soysal, Mehmet, Bloemhof, Jacqueline M. e van der Vorst, Jack G.A.J. (2012). A Review on Quantitative Models for Sustainable Food Logistics Management: Challenges and Issues. *International Journal on Food System Dynamics*, Vol. 3, No 2. p. 448-462.
- Swaminathan, Jayashankar M. (2000). *Supply Chain Management*. *International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences*, Elsevier Science
- Yadav, Salik. R., Muddada, Raja Ram M.R., Tiwari, M.K. e Shankar, R. (2009). An algorithm portfolio based solution methodology to solve a supply chain optimization problem. *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, Iss. 4. p. 8407-8420.
- Zvirgzdiņa, B. e Totujevs, J. (2013). Evolutionary Optimization of a Flow Line used ExtendSim Built-In Optimizer. *Proceedings of 13th International Conference "Reliability and Statistics in Transportation and Communication"*. Riga, Latvia. p. 155-162.

8. Anexos

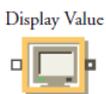
8.1. Blocos ExtendSim



Constant: Guarda valores inalterados ao longo do processo ou retém o valor das variáveis ao longo das iterações.



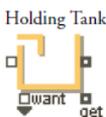
Decision: Compara os valores do *input* e retribui o output, 1 em caso verdadeiro ou 0 em caso negativo.



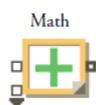
Display Value: Disponibiliza o valor da variável à medida que decorre a simulação/otimização



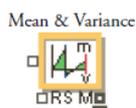
Equation: É utilizado na definição de equações e funções que não estão disponíveis noutros blocos.



Holding Tank: Acumula o *input* ao longo do tempo e permite retirar mais tarde a quantidade disponível.



Math: Realiza a operação matemática definida (adição, subtração, multiplicação, etc.)



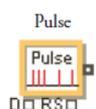
Mean & Variance: Calcula a média, variância e desvio padrão dos valores recebidos durante a simulação/otimização.



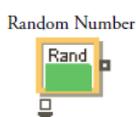
Optimizer: Procura a melhor combinação de parâmetros, de forma a otimizar a função de avaliação.



Plotter: Disponibiliza os dados em forma de gráficos e tabelas.



Pulse: Periodicamente emite uma ordem caso se verifique a condição definida.



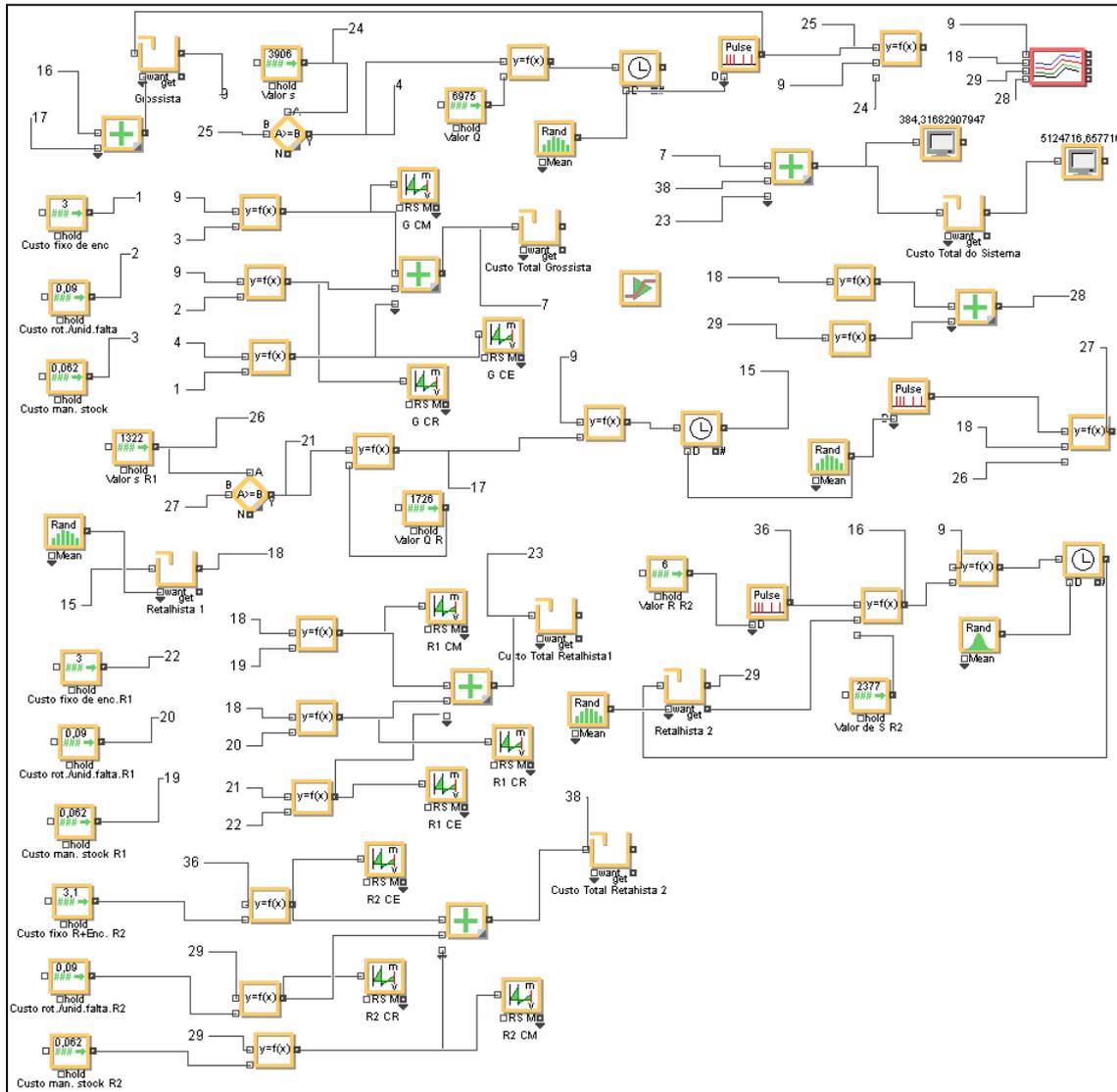
Random Number: Gera valores com base na distribuição assumida (normal, binominal, uniforme, etc.)



Wait Time: Armazena o *input* durante um determinado período de tempo antes de o transferir para o bloco seguinte.

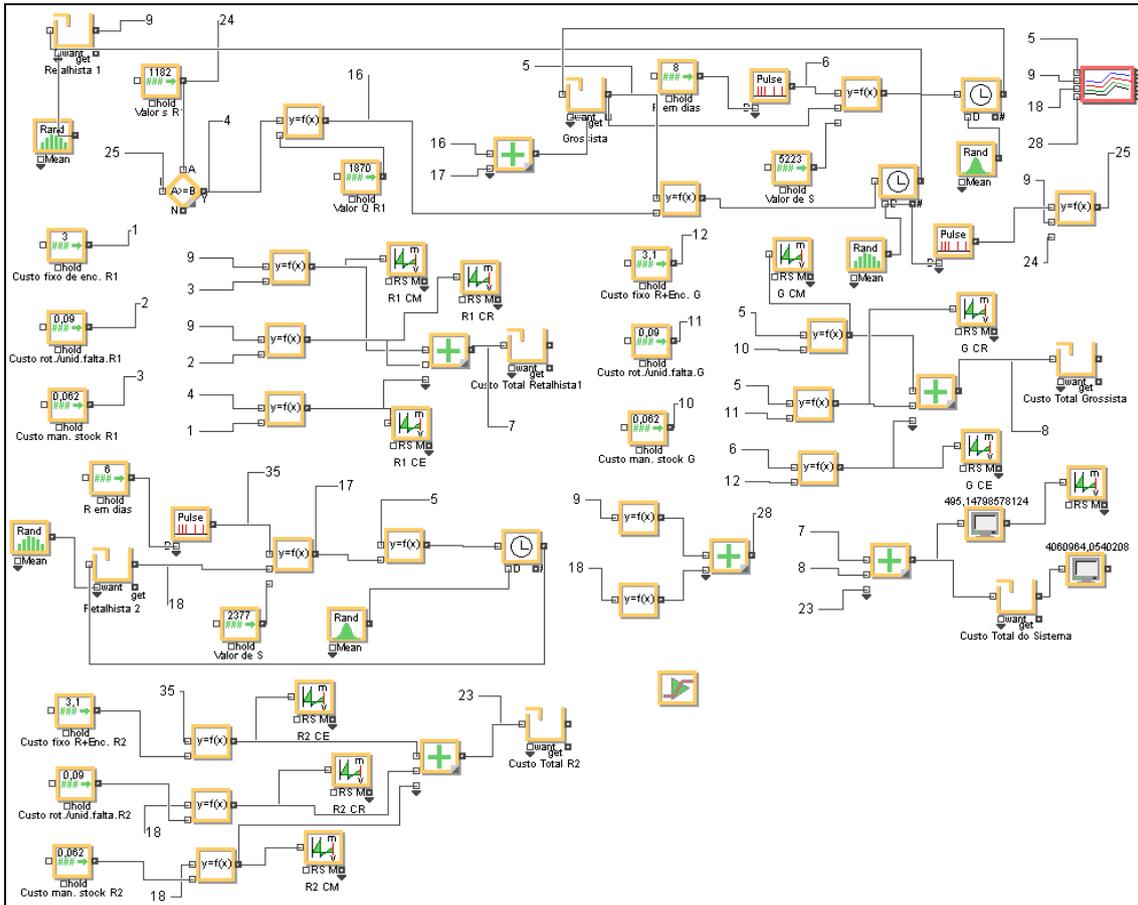
8.2. Exemplos ExtendSim

Anexo 1 – Estrutura PPR desenvolvida em ambiente ExtendSim8



O Anexo 1 representa a estrutura de cadeia de abastecimento em que a política de ponto de encomenda é seguida pelo grossista (G) e um dos retalhistas (R_1), utilizando o outro (R_2) o procedimento da revisão cíclica.

Anexo 2 – Estrutura RPR desenvolvida em ambiente ExtendSim8



No Anexo 2 está representada a estrutura de cadeia de abastecimento em que a política de revisão cíclica é empregue pelo grossista (G) e um dos retalhistas (R_2), sendo que o outro retalhista (R_1) segue a política de ponto de encomenda.