



Joana Margarida Mosquito Pais

**O Caminho do Arroz:
um Modelo de Otimização do Processo**

Coimbra, Junho de 2024



Joana Margarida Mosquito Pais

**O Caminho do Arroz:
um Modelo de Otimização do Processo**

Trabalho de projeto submetido ao Instituto Superior de Contabilidade e Administração de Coimbra para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Análise de Dados e Sistemas de Apoio à Decisão**, realizado sob a orientação do Professor Doutor Pedro João Coimbra Martins.

Coimbra, Junho de 2024

TERMO DE RESPONSABILIDADE

Declaro ser a autora deste projeto, que constitui um trabalho original e inédito, que nunca foi submetido a outra Instituição de ensino superior para obtenção de um grau académico ou outra habilitação. Atesto ainda que todas as citações estão devidamente identificadas e que tenho consciência de que o plágio constitui uma grave falta de ética, que poderá resultar na anulação do presente projeto.

DEDICATÓRIA

*... ao Homem por de trás da cortina,
ao Homem que me abriu portas,
ao Homem que inspirou este trabalho:*

Carlos A. P. Ramos

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Pedro Martins, orientador, pelo incentivo, pela disponibilidade, pelo auxílio e pelo saber científico partilhado.

Aos Professores da CBS-ISCAC, distinguindo os Professores do Mestrado de Análise de Dados e Sistemas de Apoio à Decisão, por todo conhecimento transmitido nas mais variadas áreas.

Aos meus pais, por trinta anos de carinho, de paciência e de família, e por me verem a tirar (mais) um mestrado. Aos meus avôs e avós, por me acompanharem de outra forma nesta etapa.

À minha Madrinha Margarida “Gigi”, pelos telefonemas, pelo afeto e por me levar a parar para retomar ainda mais forte.

Ao meu afilhado João, pela companhia durante as tardes de estudo, pelas ideias que me deu, pelo incentivo e por ser a inspiração de eu ser ainda melhor. À família Silva Santos, pelo carinho, pelo apoio e pela compreensão de quando eram trocados pelo computador.

À Helena “Lena das Joanelhas” Oliveira, pela amizade e por, embora diga que não entenda nada, gostar sempre de me ouvir e ver os bonecos giros.

À Cristiana, Ana Teresa e Rute, que em vez de me tirarem a ideia de tornar a estudar, não se admiraram, ainda me apoiaram mais e que acompanharam durante estes dois anos. A todos os meus amigos, que sempre tiveram uma palavra de incentivo.

À Raquel, por ser a parceira de trabalhos que nunca falhou, e ao Filipe e ao Fernando, por serem os parceiros de trabalho que (por acaso) estavam noutra grupo.

À Administração da Ernesto Morgado S.A., Professor Ernesto Morgado, D. Margarida Morgado Russo e Sr. José Manuel Russo, pela aprovação, pela preocupação e pelo carinho demonstrado também no decorrer destes dois anos.

Às Direções dos Departamentos, nas pessoas do Sr. Carlos Ramos, Dr. Rui Augusto, Dr. José Ferreira e Dra. Carolina Morgado Preve, pelo auxílio prestado, pela disponibilidade, por ouvirem os problemas e por sugerirem soluções.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Aos meus colegas, pela compreensão das minhas ausências ainda que pontuais e pelo incentivo em ser ainda mais persistente e perseverante. Ao António Roxo e ao Manuel “Mota” Cristino Oliveira, pela disponibilidade de ouvirem as minhas dúvidas e esclarecerem todo o caminho do arroz, da semente no campo ao arroz embalado.

Ao Sr. Carlos Ramos, supervisor silencioso, por me ter recebido no departamento que coordenava em 2018, pelos ensinamentos durante seis anos, pelo estímulo para tornar a estudar e encorajamento para seguir este projeto.

RESUMO

O presente Trabalho de Projeto propõe modelos de otimização matemática para as áreas de planeamento de compras e planeamento de produção numa empresa de transformação, embalamento e expedição de arroz. Os modelos matemáticos propostos foram usados para analisar um conjunto de cenários de interesse para a empresa. Na área de planeamento de compras, propõe-se uma formulação que procura responder a esse planeamento, minimizando os custos globais de aquisição, preservando quantidades mínimas de *stock* e outros requisitos operacionais e financeiros. Usando esta formulação, analisam-se diferentes cenários de variação da procura. No planeamento de produção, propõe-se uma formulação que procura o melhor planeamento produtivo de forma a minimizar as perdas de negócio, garantindo que não há rotura de stock e cumprindo com os requisitos operacionais do sistema produtivo. Neste âmbito, serão analisados diferentes cenários, envolvendo variações na procura, variações no tempo de total de laboração e na operacionalidade fabril; procurando estabelecer situações modelo que repliquem ocorrências do dia-a-dia. As soluções obtidas através das formulações propostas mostram forte adesão à realidade do planeamento de compras e do processo fabril, tornando-se assim valiosos instrumentos de simulação. No planeamento de compras, as soluções trazem uma calendarização das mesmas que aproveitam os períodos mais favoráveis de aquisição. No planeamento de produção, as soluções organizam o processo produtivo em todo o horizonte de planeamento, trazendo um sequenciamento produtivo que beneficia da melhor forma todas as limitações operacionais do processo, procurando minimizar as perdas. A sistematização proporcionada por estas soluções deverá favorecer a rentabilização do trabalho e do negócio, com forte impacto no desempenho global da empresa e nos índices de produtividade. Este Trabalho de Projeto evidencia assim as vantagens da utilização de modelos de otimização matemática para efeitos de planeamento de compras e de produção numa empresa de transformação e embalamento de arroz, podendo suscitar a sua empregabilidade a outros setores de processamento agrícola alimentar.

Palavras-chave: processamento de arroz, programação linear inteira mista, planeamento de compras, planeamento de produção, análise de cenários

ABSTRACT

The project work here presented suggests mathematical optimization models for the areas of purchasing planning and production planning, also associated to lot sizing in some Operations Research Literature, on a company of processing, packing and expedition of rice. The mathematical models proposed were used to review a series of scenarios with interest for the company. For the purchasing planning a formulation is proposed to try to answer to that planning, minimizing the global buying costs and ensuring minimum stock quantities and other operational and financial requirements. Using this formula, different scenarios of change in demand are analyzed. For the production planning a formulation is proposed to look for the best production planning in a way that minimizes business losses, assuring that there is no stock rupture and complying to the operational requirements of the productive system. In this context, different scenarios will be analyzed, involving demand rate variations, working time variations and factory operativity, trying to establish model situations that can replicate day-to-day events. The solutions achieve from the proposed formulations show a strong connection with the reality of purchasing planning and factory process, becoming valuable simulation instruments. On the purchasing planning, the solutions bring a scheduling that takes advantage of the most favorable acquisition periods. On the production planning, the solutions arrange the productive cycle on the entire spectrum of planning, bringing a productive sequence that improves in the best way all the procedure's operational limitations, trying to minimize losses. The systematization allowed by these solutions will favour the profitability of the work and business, with a strong impact on the global performance of the company and its productivity rates. This project work highlights then the advantages of using mathematical optimization models on purchasing and production planning on a company of processing and packing rice, allowing still to raise the possibility of its application on other sectors of the food agricultural process.

Keywords: rice processing, mixed-integer linear programming, purchasing planning, production planning, lot sizing, scenario analysis

ÍNDICE GERAL

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Conceitos Relativos a Arroz	2
1.2	Processo de Produção de Arroz Embalado: Etapas e Desafios	7
1.3	Proposta do Presente Estudo.....	10
2	REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1	Otimização.....	11
2.2	Estudos em Otimização de Planeamento	12
3	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	19
3.1	Formulação 1: Modelação do Planeamento de Compras	19
3.2	Formulação 2: Modelação do Planeamento da Produção.....	24
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	35
4.1	Formulação 1	37
4.1.1	Cenário A1: Dados Base.....	39
4.1.2	Cenário A2: Variação da Procura	45
4.1.2.1	Cenário A2.1: Aumento da Procura	45
4.1.2.2	Cenário A2.2: Diminuição da Procura	50
	Comparação A1-A2.....	55
4.2	Formulação 2	60
4.2.1	Cenário B1: Dados base	65
4.2.2	Cenário B2: Variação da Procura	76
4.2.2.1	Cenário B2.1: Aumento da Procura.....	77
4.2.2.2	Cenário B2.2: Diminuição da Procura.....	81
	Comparação B1-B2	85

4.2.3	Cenário B3: Variação da Horas de Trabalho	92
4.2.3.1	Cenário B3.1: Mais Horas Semanais Disponíveis.....	93
4.2.3.2	Cenário B3.2: Menos Horas Semanais Disponíveis	94
4.2.3.3	Cenário B3.3: Totalidade do dia e do mês (24/7).....	96
	Comparação B1-B3	100
4.2.4	Cenário B4: Ocorrência de Manutenção	104
4.2.4.1	Cenário B4.1: Ocorrência de Manutenção no Descasque	104
4.2.4.2	Cenário B4.2: Ocorrência de Manutenção no Embalamento	107
	Comparação B1-B4	111
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	114
5.1	Formulação 1	114
5.2	Formulação 2	115
5.3	Principais Contributos	115
5.4	Trabalho Futuro	116
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118

ÍNDICE DE TABELAS E FIGURAS

Índice de Tabelas

Tabela 1.1 - Tabela-resumo de conceitos baseada em informação legal.....	3
Tabela 1.2 - Tabela-resumo dos tipos de arroz comercializados em Portugal.	5
Tabela 4.1 - Tabela de informação do estado de entrada dos arrozes presentes na Formulação 1 e 2, com a cor identificativa do arroz.	36
Tabela 4.2 - Parâmetros usados na Formulação 1.	37
Tabela 4.3 - Tabela dos custos de aquisição mensal em euros (€) da matéria-prima.....	38
Tabela 4.4 - Tabela de informação da disponibilidade financeira máxima em euros (€) por cada mês.	39
Tabela 4.5 - Tabela de procura em toneladas de arroz para o cenário base da Formulação 1.	40
Tabela 4.6 - Tabela resumo das compras de matéria-prima e o número de lotes associados na matéria-prima basmati, jasmim, risotto, selvagem e vaporizado.....	41
Tabela 4.7 - Tabela informativa de disponibilidade financeira, gasto efetivo e excedente orçamental, em euros (€), para o cenário base da Formulação 1.....	44
Tabela 4.8 – Tabela resumo das compras de matéria-prima e o número de lotes associados na matéria-prima Basmati, Jasmim, Risotto, Selvagem e Vaporizado, perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 1.	46
Tabela 4.9 - Tabela informativa de disponibilidade financeira, gasto efetivo e excedente orçamental em euros (€) perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 1.	49
Tabela 4.10 - Tabela resumo das compras de matéria-prima e o número de lotes associados na matéria-prima Basmati, Jasmim, Risotto, Selvagem e Vaporizado, perante um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 1.	51

Tabela 4.11 - Tabela informativa de disponibilidade financeira, gasto efetivo e excedente orçamental em euros (€) perante um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 1.	54
Tabela 4.12 - Tabela resumo dos resultados e tempos de execução devolvidos pelo OpenSolver para cada cenário em estudo da Formulação 1.	55
Tabela 4.13 - Tabela resumo da resposta dos cenários em estudo da Formulação 1.	56
Tabela 4.14 - Tabela resumo das quantidades anuais de compra por matérias-primas para os três cenários, com a comparação de variação de quantidades em valor e em percentagem da Formulação 1.	58
Tabela 4.15 - Tabela-resumo dos parâmetros de tempo e dependentes deste, em minutos, de processamento de descasque de matéria-prima ($c11_j$ e $c21_j$) e de embalagem ($c12_j$ e $c22_j$).	61
Tabela 4.16 - Tabela de descrição de parâmetros para cada tipo de arroz usados na Formulação 2.	62
Tabela 4.17 - Tabela modelo de operacionalidade do descasque ($g1_{ij}$) e de embalagem ($g2_{ij}$).	63
Tabela 4.18 - Tabela resumo de informação dos parâmetros que serão variados nos cenários a apresentar, em que a célula a sombreado é o parâmetro que será variável entre cenários.	64
Tabela 4.19 - Tabela de dados de procura para o cenário base da Formulação 2.	66
Tabela 4.20 - Tabela resumo dos parâmetros do OpenSolver para cada cenário em estudo (B1 e B2) da Formulação 2.	85
Tabela 4.21 - Tabela resumo da resposta dos cenários em estudo (B1 e B2) da Formulação 2.	87
Tabela 4.22 - Tabela resumo da procura total por produto para os cenários B1 e B2.	88
Tabela 4.23 - Tabela resumo de quantidades enviadas para descasque, ou seja, total para silos ($x1$) e big-bags ($x2$).	89

Tabela 4.24 - Tabela resumo de quantidades enviadas para embalagem, ou seja, vinda de silos (x_3) e <i>big-bags</i> (x_4).	90
Tabela 4.25 - Tabela resumo dos parâmetros do OpenSolver para cada cenário em estudo (B1 e B3) da Formulação 2.....	100
Tabela 4.26 - Tabela resumo da resposta dos cenários em estudo (B1 e B3) da Formulação 2.	101
Tabela 4.27 - Tabela resumo do tempo total dos cenários e dos tempos de operacionalidade no descasque e no embalagem para os cenários em estudo (B1 e B3).	103
Tabela 4.28 - Tabela resumo dos parâmetros do OpenSolver para cada cenário em estudo (B1 e B4) da Formulação 2.....	111
Tabela 4.29 - Tabela resumo da resposta dos cenários em estudo (B1 e B4) da Formulação 2.	112
Tabela 4.30 - Tabela resumo do tempo total dos cenários e dos tempos de operacionalidade no descasque e no embalagem para os cenários em estudo (B1 e B4).	113

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Fotografia de arroz descascado (Ernesto Morgado SA, 2012).....	2
Figura 1.2 - Fotografia de arroz nos diferentes estados físicos: da esquerda para a direita, em casca, em película e branqueado (Ernesto Morgado SA, 2013).....	4
Figura 1.3 - Fotografia do desenvolvimento da semente de arroz submersa, com o respetivo crescimento vegetativo (Pais, 2019).....	7
Figura 1.4 - Representação esquemática do processo de transformação de arroz verde em casca em arroz embalado a comercializar.	8
Figura 2.1 - Representação gráfica do número de publicações numa procura de "lot sizing" e "industry".....	12
Figura 2.2 - Representação gráfica das áreas de publicações numa procura de "lot sizing" e "industry".....	13
Figura 3.1 - Representação esquemática do processo de compra de matéria-prima.	20
Figura 3.2 - Representação esquemática do processo entre matéria-prima, produto descascado e armazenado (silos ou <i>big-bags</i> , na imagem BB) e embalado.....	24
Figura 3.3 - Representação visual do mecanismo de limpezas.	33
Figura 4.1 - Representação gráfica da procura para o cenário base da Formulação 1.	39
Figura 4.2 - Representação gráfica das compras de matéria-prima do cenário base da Formulação 1.	41
Figura 4.3 - Representação gráfica do número de lotes de Basmati, Jasmim, Risotto, Selvagem e Vaporizado a adquirir no cenário base da Formulação 1.	42
Figura 4.4 - Representação gráfica do <i>stock</i> de matéria-prima em final de mês no cenário base da Formulação 1.	42
Figura 4.5 - Conjunto de representações gráficas das existências do <i>stock</i> dos sete produtos no cenário base da Formulação 1.	43
Figura 4.6 - Representação gráfica do limite orçamental para o cenário base da Formulação 1.	44

Figura 4.7 - Representação gráfica da procura perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 1.....	45
Figura 4.8 - Representação gráfica das compras de matéria-prima perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 1.	47
Figura 4.9 - Representação gráfica do número de lotes de basmati, jasmim, risotto, selvagem e vaporizado a adquirir prima perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 1.	47
Figura 4.10 - Representação gráfica do <i>stock</i> de matéria-prima em final de mês perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 1.....	48
Figura 4.11 - Conjunto representações gráficas do acompanhamento de <i>stock</i> dos sete produtos perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 1..	48
Figura 4.12 - Representação gráfica do limite orçamental perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 1.....	49
Figura 4.13 - Representação gráfica da procura perante um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 1.	50
Figura 4.14 - Representação gráfica das compras de matéria-prima perante um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 1.	51
Figura 4.15 - Representação gráfica do número de lotes de Basmati, Jasmim, Risotto, Selvagem e Vaporizado a adquirir prima perante um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 1.	52
Figura 4.16 - Representação gráfica do <i>stock</i> de matéria-prima em final de mês perante um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 1.	52
Figura 4.17 - Conjunto de representações gráfica do acompanhamento de <i>stock</i> dos sete produtos perante um cenário de diminuição de 20%, face ao cenário base da Formulação 1.	53
Figura 4.18 - Representação gráfica do limite orçamental perante um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 1.	53

Figura 4.19 - Conjunto de representações gráficas das compras das matérias primas segundo os diferentes cenários da Formulação 1.....	57
Figura 4.20 - Representação gráfica do limite orçamental e dos gastos mensais pelos cenários da Formulação 1.	59
Figura 4.21 - Representação gráfica da procura para o cenário base da Formulação 2.	65
Figura 4.22 - Representação gráfica dos incumprimentos associados ao cenário base da Formulação 2.	67
Figura 4.23 - Representação gráfica do número de limpezas diárias do cenário base da Formulação 2.	67
Figura 4.24 - Representação gráfica da produção para <i>big-bags</i>	68
Figura 4.25 - Representação esquemática das variáveis associadas ao descasque e ao embalamento.....	68
Figura 4.26 - Representação gráfica dos tempos de processamento para os produtos em estudo, diferenciando se segue para silo ($x1_{ij}$, visualmente a cheio) ou para <i>big-bags</i> ($x2_{ij}$, visualmente a tracejado), com os respetivos tempos de limpeza entre diferentes tipos de arroz, para o cenário base da Formulação 2.	69
Figura 4.27 - Representação gráfica da quantidade que enviada para silos.	70
Figura 4.28 - Representação gráfica da quantidade que enviada para <i>big-bags</i>	70
Figura 4.29 - Representação visual do <i>stock</i> de arroz em silos ($s2_{ij}$).	71
Figura 4.30 - Representação gráfica do uso dos silos no final do dia, face ao produto presente em cada, para o cenário base da Formulação 2.	72
Figura 4.31 - Representação visual do <i>stock</i> de arroz em <i>big-bags</i> ($s3_{ij}$).	73
Figura 4.32 - Representação gráfica dos tempos de embalamento para os produtos em estudo, diferenciando se provem de para silo ($x3_{ij}$, visualmente a cheio) ou de <i>big-bags</i> ($x4_{ij}$, visualmente a tracejado).	73
Figura 4.33 - Representação gráfica da quantidade de arroz processada de silo para produto embalado.....	74

Figura 4.34 - Representação gráfica da quantidade de arroz processada de <i>big-bag</i> para produto embalado.	74
Figura 4.35 - Representação gráfica dos <i>stocks</i> iniciais e finais de arroz embalado.	75
Figura 4.36 - Representação gráfica dos <i>stocks</i> iniciais e finais de arroz em silos.	75
Figura 4.37 - Representação gráfica dos <i>stocks</i> iniciais e finais de arroz em <i>big-bags</i>	76
Figura 4.38 - Representação gráfica da procura perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base.....	77
Figura 4.39 - Representação gráfica dos incumprimentos associados um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 2.	78
Figura 4.40 - Representação gráfica do número de limpezas diárias associados um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 2.	78
Figura 4.41 - Representação gráfica dos tempos de processamento para os produtos em estudo, diferenciando se segue para silo ($x1_{ij}$, visualmente a cheio) ou para <i>big-bags</i> ($x2_{ij}$, visualmente a tracejado), com os respetivos tempos de limpeza entre diferentes tipos de arroz, perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 2.....	79
Figura 4.42 - Representação gráfica do uso dos silos no final do dia, face ao produto presente em cada, perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 2.	80
Figura 4.43 - Representação gráfica dos tempos de embalamento para os produtos em estudo, diferenciando se provem de para silo ($x3_{ij}$, visualmente a cheio) ou de <i>big-bags</i> ($x4_{ij}$, visualmente a tracejado), perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 2.	81
Figura 4.44 - Representação gráfica da procura perante um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 2.	82
Figura 4.45 - Representação gráfica dos incumprimentos associados um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 2.	82
Figura 4.46 - Representação gráfica do número de limpezas diárias associados um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 2.	83

Figura 4.47 - Representação gráfica dos tempos de processamento para os produtos em estudo, diferenciando se segue para silo ($x1_{ij}$, visualmente a cheio) ou para <i>big-bags</i> ($x2_{ij}$, visualmente a tracejado), com os respetivos tempos de limpeza entre diferentes tipos de arroz, para o cenário base da Formulação 2.	83
Figura 4.48 - Representação gráfica do uso dos silos no final do dia, face ao produto presente em cada, perante um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 2	84
Figura 4.49 - Representação gráfica dos tempos de embalamento para os produtos em estudo, diferenciando se provem de para silo ($x3_{ij}$, visualmente a cheio) ou de <i>big-bags</i> ($x4_{ij}$, visualmente a tracejado), perante um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 2.	85
Figura 4.50 - Representação gráfica do <i>stock</i> de produto embalado final para os cenários em estudo e do <i>stock</i> mínimo definido.	91
Figura 4.51 - Representação gráfica do <i>stock</i> de produto em silos para os cenários em estudo e do <i>stock</i> mínimo definido.	91
Figura 4.52 - Representação gráfica do <i>stock</i> de produto em <i>big-bags</i> para os cenários em estudo e do <i>stock</i> mínimo definido.	92
Figura 4.53 - Representação gráfica dos tempos de processamento para os produtos em estudo, diferenciando se segue para silo ($x1_{ij}$, visualmente a cheio) ou para <i>big-bags</i> ($x2_{ij}$, visualmente a tracejado), com os respetivos tempos de limpeza entre diferentes tipos de arroz, perante um cenário de aumento de tempo de laboração ao cenário base da Formulação 2.	93
Figura 4.54 - Representação gráfica dos tempos de embalamento para os produtos em estudo, diferenciando se provem de para silo ($x3_{ij}$, visualmente a cheio) ou de <i>big-bags</i> ($x4_{ij}$, visualmente a tracejado), perante um cenário de aumento de tempo de laboração face ao cenário base da Formulação 2.	94
Figura 4.55 - Representação gráfica dos tempos de processamento para os produtos em estudo, diferenciando se segue para silo ($x1_{ij}$, visualmente a cheio) ou para <i>big-bags</i> ($x2_{ij}$, visualmente a tracejado), com os respetivos tempos de limpeza entre diferentes tipos de	

arroz, perante um cenário de diminuição de tempo de laboração semanal face ao cenário base da Formulação 2.	95
Figura 4.56 - Representação gráfica dos tempos de embalagem para os produtos em estudo, diferenciando se provem de para silo (x_{3ij} , visualmente a cheio) ou de <i>big-bags</i> (x_{4ij} , visualmente a tracejado), perante um cenário de diminuição de tempo de laboração semanal face ao cenário base da Formulação 2.	96
Figura 4.57 - Representação gráfica dos tempos de processamento para os produtos em estudo, diferenciando se segue para silo (x_{1ij} , visualmente a cheio) ou para <i>big-bags</i> (x_{2ij} , visualmente a tracejado), com os respetivos tempos de limpeza entre diferentes tipos de arroz, perante um cenário de aumento tempo de laboração face ao cenário base da Formulação 2.	97
Figura 4.58 - Representação gráfica dos tempos de embalagem para os produtos em estudo, diferenciando se provem de para silo (x_{3ij} , visualmente a cheio) ou de <i>big-bags</i> (x_{4ij} , visualmente a tracejado), perante um cenário de aumento de tempo de laboração face ao cenário base da Formulação 2.	98
Figura 4.59 - Representação gráfica dos tempos de processamento para os produtos em estudo, diferenciando se segue para silo (x_{1ij} , visualmente a cheio) ou para <i>big-bags</i> (x_{2ij} , visualmente a tracejado), com os respetivos tempos de limpeza entre diferentes tipos de arroz, perante um cenário de aumento de tempo de laboração face ao cenário base da Formulação 2.	99
Figura 4.60 - Representação gráfica dos tempos de embalagem para os produtos em estudo, diferenciando se provem de para silo (x_{3ij} , visualmente a cheio) ou de <i>big-bags</i> (x_{4ij} , visualmente a tracejado), perante um cenário de aumento de tempo de laboração face ao cenário base da Formulação 2.	99
Figura 4.61 - Representação gráfica dos tempos de processamento para os produtos em estudo, diferenciando se segue para silo (x_{1ij} , visualmente a cheio) ou para <i>big-bags</i> (x_{2ij} , visualmente a tracejado), com os respetivos tempos de limpeza entre diferentes tipos de arroz, perante um cenário de manutenção no descasque na terceira semana face ao cenário base da Formulação 2.	105

Figura 4.62 - Representação gráfica do uso dos silos no final do dia, face ao produto presente em cada, perante um cenário de manutenção no descasque na terceira semana face ao cenário base da Formulação 2.	105
Figura 4.63 - Representação gráfica dos tempos de embalagem para os produtos em estudo, diferenciando se provem de para silo ($x3_{tj}$, visualmente a cheio) ou de <i>big-bags</i> ($x4_{tj}$, visualmente a tracejado), perante um cenário de manutenção no descasque na terceira semana face ao cenário base da Formulação 2.	106
Figura 4.64 - Representação gráfica do <i>stock</i> de arroz embalado ($s1_{tj}$) perante um cenário de manutenção no descasque na terceira semana face ao cenário base da Formulação 2.	107
Figura 4.65 - Representação gráfica dos incumprimentos associados perante um cenário de manutenção no embalagem na terceira semana face ao cenário base da Formulação 2.	108
Figura 4.66 - Representação gráfica dos tempos de processamento para os produtos em estudo, diferenciando se segue para silo ($x1_{tj}$, visualmente a cheio) ou para <i>big-bags</i> ($x2_{tj}$, visualmente a tracejado), com os respetivos tempos de limpeza entre diferentes tipos de arroz, perante um cenário de manutenção no embalagem na terceira semana face ao cenário base da Formulação 2.	109
Figura 4.67 - Representação gráfica do uso dos silos no final do dia, face ao produto presente em cada, perante um cenário de manutenção no embalagem na terceira semana face ao cenário base da Formulação 2.	110
Figura 4.68 - Representação gráfica dos tempos de embalagem para os produtos em estudo, diferenciando se provem de para silo ($x3_{tj}$, visualmente a cheio) ou de <i>big-bags</i> ($x4_{tj}$, visualmente a tracejado), perante um cenário de manutenção no embalagem na terceira semana face ao cenário base da Formulação 2.	110

Lista de Abreviaturas, Acrónimos e Siglas

Área Comercial

SA	Sociedade Anónima
SKU	<i>Stock Keeping Unit</i>

Área Industrial

AB	Arroz branqueado
ACP	Arroz em casca/película
AE	Arroz embalado
AP	Arroz em película
ApE	Arroz para embalar
ASC	Arroz seco em casca
AVC	Arroz verde em casca
BB	<i>Big-bags</i>
Cs	Casca
I	Impurezas
PE	Produto para expedição
TG	Trinca grada
TM	Trinca média
Tm	Trinca miúda

Organizações

FAO/WHO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations / World Health Organization</i>
UTC-ABD	Divisão de Negócios Agrícolas

Siglas do Capítulo 4

A	Agulha
B	Basmati
C	Carolino
J	Jasmim
R	Risotto
S	Selvagem
V	Vaporizado

Unidades

€	Euros
mm	Milímetros
ton	Toneladas

1 INTRODUÇÃO

O aumento do custo de vida é um fator de destaque que tem marcado o cenário económico do século XXI. Não será então de estranhar que as várias áreas industriais procurem rentabilizar as matérias-primas, reduzir desperdícios e baixar os custos envolvidos durante o processamento, em que há desafios na procura pela eficiência, qualidade e sustentabilidade. Especificamente na área fabril, e em particular em fábricas de arroz, onde o processamento envolve múltiplas etapas, a otimização da produção surge como uma estratégia fundamental para enfrentar os desafios operacionais e maximizar a eficiência.

Este trabalho teve por base o conhecimento obtido numa fábrica de arroz em Portugal e torna-se importante pela necessidade constante e transversal a qualquer indústria de aprimorar a eficiência operacional e reduzir custos. O conhecimento do processo fabril permitiu desenhar a estrutura e foi deveras fulcral para compreender e definir os pontos chave para a definição do modelo.

O arroz desempenha um papel crucial em diversas dietas ao redor do mundo, sendo um produto natural fundamental ligado a uma ampla variedade de pratos. Esse facto eleva a indústria do arroz a uma posição decisiva globalmente. Além de contribuir significativamente para a segurança alimentar, fornecendo alimentos básicos para populações em todo o mundo, esta indústria também desempenha um papel vital na economia, gerando empregos e impulsionando o comércio global de alimentos.

É um dos cereais mais consumidos e importantes a nível mundial, desempenhando um papel vital na segurança alimentar global. Os primeiros indícios do seu cultivo remontam a província da China, da Tailândia e na Índia, há mais de 4000 anos (Sociedade Portuguesa de Inovação & Associação Nacional dos Industriais de Arroz, 1999).



Figura 1.1 - Fotografia de arroz descascado (Ernesto Morgado SA, 2012).

O nome científico é *Oryza Sativa L* e é um grão colhido numa planta da família das gramíneas, um produto natural nutricionalmente importante e um dos alimentos mais consumidos no Mundo (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023; Joint FAO/WHO, 1992). Sendo um produto natural, é uma fonte natural de hidratos de carbono e proteínas, com baixo teor de gorduras, que não requer a utilização de aditivos para a sua conservação (Sociedade Portuguesa de Inovação & Associação Nacional dos Industriais de Arroz, 1999). Para além disto, é um cereal livre de glúten, sendo uma opção alimentar segura para parte da população que é celíaca.

1.1 Conceitos Relativos a Arroz

A utilização dos termos relacionados ao arroz é fundamental para garantir uma compreensão clara do seu cultivo e processamento. Empregar os termos corretos promove eficiência na comunicação sobre indústria e assegura conformidade com padrões regulatórios, contribuindo para a transparência e confiabilidade na cadeia alimentar.

Geralmente, o consumidor não conhece os termos definidos na legislação, sendo mais comum denominar os diferentes tipos de arroz pela aparência que lhe é mais

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

diferenciadora. Porém, torna-se importante clarificar alguns termos associados a características do arroz segundo a área produtiva e comercial. Com base na informação disponível no Decreto-Lei nº 157/2017 do Ministério da Agricultura, Florestas e Desenvolvimento Rural (2017), podem ser apresentados vários termos e conceitos que serão usados durante o presente trabalho. Essa informação encontra-se presente na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Tabela-resumo de conceitos baseada em informação legal.

Características	Definição
Estado físico	
<i>Arroz em casca</i>	Arroz que ainda tem a casca, após a retirada do grão da espiga
<i>Arroz em película ou integral</i>	Arroz em que a casca foi removida, ainda com o gérmen e todas ou parte das camadas externas do pericarpo
<i>Arroz branqueado</i>	Arroz em que foi removida a casca e a totalidade das camadas do pericarpo, com totalidade ou parte da remoção do gérmen
Dimensão	
<i>Arroz de grão redondo</i>	Arroz em que os grãos têm um comprimento inferior ou igual a 5,2 mm e a relação comprimento largura é inferior a 2
<i>Arroz de grão médio</i>	Arroz em que os grãos têm um comprimento entre 5,2 mm e inferior ou igual a 6 mm e a relação comprimento largura é inferior a 3
<i>Arroz de grão longo de Categoria A</i>	Arroz em que os grãos têm um comprimento superior a 6,0 mm e a relação comprimento largura é entre a 2 e 3
<i>Arroz de grão longo de Categoria B</i>	Arroz em que os grãos têm um comprimento superior a 6,0 mm e a relação comprimento largura é igual ou superior a 3

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Tratamento	<i>Arroz vaporizado</i>	Arroz que, em casca ou película, é submetido a um processo industrial de imersão em água, vaporização e secagem
	<i>Arroz glaciado</i>	Arroz branqueado envolvido numa película de glucose e talco, próprios para consumo humano
	<i>Arroz matizado</i>	Arroz branqueado envolvido numa camada de óleo comestível, com legislação própria
	<i>Arroz tufado</i>	Arroz em película ou branqueado submetido a tratamento em alta pressão, expandindo-o



Figura 1.2 - Fotografia de arroz nos diferentes estados físicos: da esquerda para a direita, em casca, em película e branqueado (Ernesto Morgado SA, 2013).

Como se pode verificar anteriormente, o arroz pode ser caracterizado segundo o estado físico, as dimensões ou o tratamento que tem. Enquanto a classificação segundo o estado físico e o tratamento se tenham mantido ao longo dos tempos, a classificação segundo as dimensões seguia outro modelo. A separação do arroz longo em categorias, dependendo do quociente entre o comprimento e a largura, era feita segundo a variedade japónica ou índica (Lezírias Ribatejanas, 2018). Hoje em dia, a nível industrial, continua a ser usada

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

essa denominação em que a Categoria A se refere à variedade japónica e a Categoria B se refere à variedade índica.

Será importante anotar dois pontos da tabela anterior referentes ao arroz Integral e ao arroz Vaporizado. Cientificamente aprovado, descrito pelos vários decretos de lei e aplicado pela indústria, estes não são tipos de arroz mas sim um estado e um tratamento que o arroz tem, respetivamente. Porém, a denominação como tipos de arroz por parte do consumidor origina assim um desvio à classificação. Também o arroz Selvagem é considerado um tipo de arroz, mas cientificamente é uma semente de outra espécie.

Deste modo, a Tabela 1.2 apresenta os vários tipos de arroz comercializados atualmente em Portugal, acrescentando ainda o arroz Integral, o arroz Selvagem e o arroz Vaporizado pelo impacto de vendas que acarretam. Foram analisadas as páginas eletrónicas das várias empresas (Arrozeiras Mundiarroz S.A., 2023; Ernesto Morgado S.A., 2014; Novarroz - Produtos Alimentares S.A., 2023; Valente Marques S.A., 2024b, 2024a, 2024c) que comercializam arroz de forma a obter a informação bem como do grupo Unilever Food Solutions Portugal (2023).

Tabela 1.2 - Tabela-resumo dos tipos de arroz comercializados em Portugal.

<i>Tipo de Arroz</i>	<i>Propriedades Físico-Químicas</i>
<i>Agulha</i>	• Variedade índica; • Grão longo de Categoria B; • Visualmente grão fino e longo, vítreo e consistente; • Baixo teor de amilose
<i>Basmati</i>	• Variedade índica; • Arroz aromático; • Visualmente de grão fino e longo, que com a cozedura duplica o tamanho; • Originário do Médio Oriente e da Ásia Central.
<i>Carolino</i>	• Variedade japónica; • Elevado teor de amilose – permite absorver os sabores; • Tipo de arroz mais utilizado nos pratos típicos portugueses.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

<i>Risotto</i>	• Variedade japónica, com produção em Itália • Algumas variedades: Arborio, Baldo, Carnaroli, Maratelli, Padano, Roma, Vialone Nano. • Rico em amido de amilopectina.
<i>Sushi</i>	• Variedade japónica, com produção no Japão; • Visualmente de grão curto ligeiramente arredondado; • Algumas variedades: Koshihikari, Hitomebore e Akitakomachi.
<i>Thai Jasmim</i>	• Variedade índica, com produção na Tailândia; • Arroz aromático, geralmente descrito como floral e perfumado.
<i>Integral</i>	• Pode ser de variedade índica ou japónica; • Não passou pela totalidade do processo industrial; • Tem elevado teor em fibras e minerais.
<i>Selvagem</i>	• Não é propriamente arroz, é uma semente de capim aquático, a espécie <i>Zizania</i> aquática, cultivada na América do Norte; • Visualmente os são grãos longos, finos e pretos ou castanhos.
<i>Vaporizado</i>	• Pode ser de variedade índica ou japónica; • Arroz submetido a um tratamento de cozimento a vapor; • Visualmente de tonalidade amarelada, firme e rico em fibras e minerais.

Existe ainda um produto proveniente do arroz. A trinca de arroz são grãos que foram quebrados durante a colheita, processamento ou transporte. No Decreto-Lei nº 157/2017 (2017), são referidas as classificações face às dimensões – trinca grada, média, miúda ou migalha. Geralmente têm um preço de mercado mais baixo, devido à perceção de qualidade inferior, mas são um produto para um mercado específico, dado que podem ser usadas para suplementação de papas infantis, farinha de arroz, alimentação animal, colas, entre outras.

1.2 Processo de Produção de Arroz Embalado: Etapas e Desafios

Embora seja referida a “produção de arroz”, esta expressão está relacionada com a agricultura, ou seja, as várias fases que se iniciam com a preparação do solo até à colheita da espiga de arroz. A nível nacional, este processo ocorre numa das três bacias hidrográficas – Rio Mondego, Rio Tejo e Rio Sado –, pois é uma cultura que depende do fornecimento adequado de água para o seu crescimento e desenvolvimento.

Após o solo estar preparado, este é alagado para depois as sementes serem espalhadas. Apesar de hoje em dia serem possíveis sementeiras em seco, a tradição continua a ser com terrenos alagados (Roxo, 2024). Após o desenvolvimento de raízes, o crescimento vegetativo (Figura 1.3) e a formação de grãos, controlando as pragas e infestantes, obtém-se a espiga com os grãos de arroz. A ceifa dos grãos de arroz ocorre quando estes têm a maturidade desejada, sendo cortada a palha, separando-se assim os grãos da espiga – a debulha do grão. Este arroz em casca pode ser seco antes ou depois de ir para a indústria, mas deverá ser seco antes de ser armazenado. Verificando-se que só ocorre uma sementeira por ano, é extremamente importante que o armazenamento do arroz ocorra nas melhores condições de temperatura, humidade e pragas, como o gorgulho.

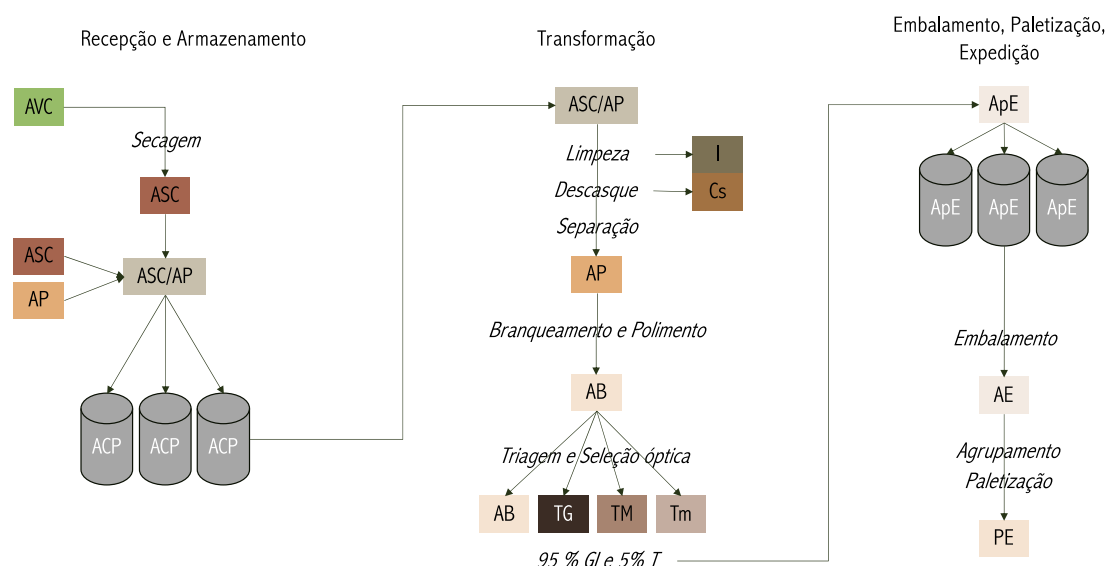


Figura 1.3 - Fotografia do desenvolvimento da semente de arroz submersa, com o respetivo crescimento vegetativo (Pais, 2019).

Por sua vez, na indústria ocorre a transformação e abrange todo o processo de recebimento do produto em casca até à comercialização na forma de arroz branqueado, empacotado

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

ou em *big-bags*. Será esta parte do processo o foco do trabalho, embora não se possa descurar toda a componente agrícola, importante para a obtenção do melhor produto final. O arroz pode entrar na fábrica no estado verde, ou seja, logo após a colheita, ou no estado seco (Cristino, 2023). O arroz é então armazenado em silos quando se encontra no estado seco, representados na Figura 1.4 pelos cilindros do lado esquerdo. Segue-se a fase de transformação que inclui a limpeza de impurezas, como restos de palha do arroz, milhã (uma planta infestante que é colhida aquando o corte), pequenas pedras dos solos, entre outras; o descasque do arroz e por fim a separação da casca do arroz em película (Cristino, 2023). De seguida, ocorre a remoção da película do arroz e obtém-se arroz branqueado, separando o grão inteiro e as trincas presentes no arroz. Tal como se encontra legislado no Decreto-Lei nº 157/2017 (2017), o arroz é embalado num rácio de 95% de grão inteiro e 5% de trincas, mistura essa que é logo encaminhada para os silos de embalagem. Por fim, o arroz é embalado, agrupado nos *packs* definidos pela indústria, paletizado e, por fim, expedido. A Figura 1.4 demonstra o processo anteriormente descrito.



Legenda: AVC – Arroz verde em casca; ASC – Arroz seco em casca; AP – Arroz em película; ACP – Arroz em casca/película; I – Impurezas; Cs – Casca; AB – Arroz branqueado; TG – Trinca grada; TM – Trinca média; Tm – Trinca miúda; ApE – Arroz para embalar; AE – Arroz embalado; PE – Produto para expedição; Representações cilíndricas demonstram o uso de silos.

Figura 1.4 - Representação esquemática do processo de transformação de arroz verde em casca em arroz embalado a comercializar.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

É de notar que nem todos os arrozes são rececionados na fábrica no mesmo estado. Assim, um arroz seco quer esteja em casca, quer esteja em película entra em fabrico após a secagem e um arroz branqueado tem uma passagem na fase de transformação de forma muito mais rápida, pois não é espectável que tenha o mesmo processo que arrozes nos outros dois estados. Como é observável no esquema, este processo ocorre de forma ordenada. Tendo uma estrutura sequencial, significa que não ocorrem saltos no processo e implica ainda a identificação muito clara do ponto de entrada para o arroz branqueado. Perante a necessidades de controlo de qualidade, há ainda pontos de extração de amostras.

Assim, é possível identificar vários pontos críticos:

- Face ao arroz:
 - A existência de matéria-prima;
 - A variedade de arroz, em que arroz da variedade japónica não pode ser misturado com arroz de variedade índica;
 - O estado do produto à entrada, variando entre estado em casca, película ou branqueado;
 - O tipo de arroz, em que arroz Agulha, Basmati, Carolino, Jasmim, Risotto, Selvagem, Sushi, Vaporizado entre outros não podem ser misturados.
- Face à estrutura:
 - A existência de uma linha de descasque;
 - Qualquer troca de produção, implica limpeza na fase de transformação, mas não no embalamento.
- Face à capacidade:
 - Existência limitada de silos para matéria-prima e para produto branqueado (representados na Figura 1.4, à esquerda e à direita, respetivamente);
 - Limite de capacidade dos silos;
 - Possibilidade de armazenar os vários produtos em *big-bags* em armazéns.

1.3 Proposta do Presente Estudo

Deste modo, este trabalho tem como objetivo explorar, analisar e definir modelos matemáticos que respondam às seguintes questões:

Q1: “Qual o melhor planeamento de compras de forma a não haver roturas de *stock*, cumprindo com os requisitos logísticos do sistema produtivo?”

Q2: “Qual o melhor planeamento produtivo de forma a minimizar as perdas de negócio, garantindo que não há rotura de *stock*, reduzindo as mudanças de tipo de produto e cumprindo com os requisitos operacionais do sistema produtivo?”

Assim, procurar-se-á fornecer uma visão clara dos desafios e como a otimização do planeamento pode ser uma resposta eficaz. A análise dos resultados obtidos e a discussão dos mesmos permitirão avaliar a efetividade das estratégias adotadas, identificando áreas de melhoria para a indústria de processamento do arroz e que se poderão estender a outros alimentos. No final, as conclusões desta pesquisa não resumirão apenas os principais resultados, mas também apontarão para direções futuras e contribuições potenciais para o avanço contínuo da otimização de produção em fábricas de arroz e, por extensão, na indústria alimentar como um todo.

No decorrer deste trabalho, foi adotada uma estrutura específica. No capítulo 2, é apresentada uma breve revisão da literatura, focando a informação de suporte para o desenvolvimento do trabalho. O capítulo 3 apresenta as formulações, respetivas restrições e a explicação das mesmas, enquanto o capítulo 4 utiliza as formulações propostas para uma análise sistematizada de cenários hipotéticos, com as respetivas análises comparativas. Por fim, o último capítulo apresenta as principais conclusões deste trabalho bem como os aspetos que se revelaram críticos para uma análise extensiva futura.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo será apresentada uma breve revisão da literatura, abordando estudos anteriores relacionados com a otimização em compras e na produção em indústrias, em que, sempre que possível, na área alimentar da orizicultura. Encontra-se organizado com uma pequena parte sobre os conceitos mais gerais associados à otimização e, de seguida, pela perspectiva de compras e produção.

2.1 Otimização

A otimização é um conceito fundamental em várias áreas, desde a engenharia até a economia, sendo, conceitualmente, um domínio científico da matemática. Com o objetivo de obter a melhor solução possível para um determinado problema, no âmbito da otimização monobjetivo, procura-se maximizar ou minimizar uma determinada característica. Na área industrial, o foco tanto poderá passar por maximizar ganhos ou minimizar custos. O problema poderá incluir restrições que deverão traduzir as diversas condições funcionais do problema, procurando caracterizar matematicamente a realidade,

No contexto de operações e logística na indústria, a otimização desempenha um papel crucial na gestão eficiente dos recursos e processos. Há várias áreas suscetíveis à implementação de modelos de otimização e de melhoria constante. Pode-se identificar os seguintes exemplos: o planeamento da produção (Zhang et al., 2017), determinando o tamanho ideal dos lotes de produção ou compra para minimizar os custos de arranque, armazenamento e transporte, tendo em vista a resposta à procura do cliente; planeamento de rotas de veículos (Maiyar & Thakkar, 2019), minimizando distâncias percorridas, tempo de viagem e custos operacionais, enquanto considera as restrições de tempo e capacidade; gestão de *stocks* (Beemsterboer et al., 2017), de forma a otimizar os níveis para garantir disponibilidade de produtos, minimizando os custos de armazenamento.

Na indústria alimentar, a utilização de modelos de otimização permite responder a desafios atuais, através do melhoramento da eficiência operacional e da redução do desperdício (Behzadi et al., 2018), otimizar os processos de produção, mantendo a eficiência e a sustentabilidade (Md Mashud et al., 2022). Para além disso, tem uma

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

elevada ação nos processos de qualidade, como a rastreabilidade e cumprimento de segurança alimentar.

2.2 Estudos em Otimização de Planeamento

Perante os objetivos delineados para este trabalho, é perceptível como a otimização de produção permite assim alcançá-los. A gestão eficiente da produção, através do seu planeamento, desempenha um papel crucial na indústria do arroz, pois permite reduzir os custos de armazenagem, de compras e de produção, melhorar rendimentos e tempos de funcionamento, responder assertivamente à procura e aumentar a competitividade no mercado.

Primeiramente, considerou-se importante conhecer os desenvolvimentos na área em estudo. Deste modo, procurou-se saber a evolução do tema ao longo dos anos. Uma das expressões mais importantes nesta área é “*lot sizing*”. Embora se pudesse considerar que a tradução de planeamento de produção, ou seja, “*production planning*” seria sinónimo, na área de otimização, o termo mais usual é “*lot sizing*”. Assim, usando a base científica de artigos *Science Direct*, propriedade da empresa *Elsevier*, realizou-se uma primeira procura com os temas “*lot sizing*” e “*industry*”. Esta procura, bastante alargada, permite numa fase inicial observar a importância destes temas ao longo dos anos - Figura 2.1.



Figura 2.1 - Representação gráfica do número de publicações numa procura de “*lot sizing*” e “*industry*”.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Considerando os trabalhos identificados pela pesquisa a partir de 1975, é a partir de 2000 que apresenta um crescimento assinalável do número de publicações anuais, mas somente há dez anos é que ultrapassou as duas centenas. Sabe-se que o valor referente a 2024 está incompleto, dado que o ano ainda não finalizou. Torna-se ainda necessário avaliar o valor referente a 2023. Sendo inferior ao do ano anterior, esta ocorrência apresenta um comportamento estranho. Porém, torna-se necessário relembrar que a pesquisa se focou com o termo “*lot sizing*” e, se se estendesse também à expressão “*production planning*”, os valores seriam mais elevados.

Estes 7470 documentos publicados são maioritariamente artigos científicos, ultrapassando os 80%. Seguidamente, o maior número de publicações é de capítulos de livros e artigos de revisão.

Outro foco importante dos artigos é compreender para que área são mais dirigidos.

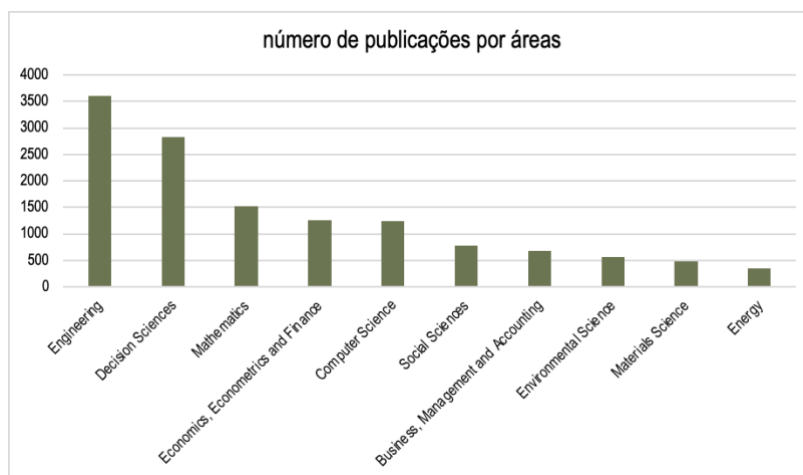


Figura 2.2 - Representação gráfica das áreas de publicações numa procura de “*lot sizing*” e “*industry*”.

Perante as questões levantadas, em que se pode identificar tanto a área de tomada de decisões e gestão, a seleção seria para “*Decision Sciences*”, “*Business, Management and Accounting*” e, por fim, “*Computer Science*”. A escolha do termo “*Computer Science*” focou-se na perspetiva de utilização da ferramenta com uma visão mais futurista. Por outro lado, a escolha destas áreas não implica que as restantes não sejam também

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

relevantes para o planeamento de produção. Atente-se que esta escolha deixou de lado o termo “*Mathematics*” que contribuiria provavelmente com informação mais relevantes.

Deste modo, realizou-se uma segunda procura com “*lot sizing*”, “*industry*”, “*food*” e “*rice*”, procurando-se assim obter conhecimento de aplicação de planeamento de produção na indústria, especificamente na do arroz. Após a obtenção de 104 resultados, usaram-se as áreas selecionadas para filtrar, finalizando assim com 30 resultados – cinco artigos de revisão, vinte e dois artigos de desenvolvimento, dois capítulos de livro e uma entrevista, identificada como outros na tipologia de publicação.

Embora se tenha aplicado o máximo de filtros para obter a informação o mais específica possível, é notório que continua a surgir uma enorme variedade de temas, podendo-se identificar a área agrícola na cadeia de abastecimento, localização de pontos de vendas e transportes como a resposta obtida. Ainda assim, pode-se ressaltar quatro artigos desta pesquisa que se revelaram interessantes, focam princípios determinantes para este trabalho e que serão apresentados de seguida.

Na revisão bibliográfica de Behzadi et al. (2018), é analisada a cadeia de abastecimento em negócios agrícolas. Há características neste tipo de negócios extremamente específicas e que envolvem maior risco: a sazonalidade, os picos de oferta e a perecibilidade. Por sua vez, estes riscos podem ser contornados usando modelos matemáticos para cenarizar e, preventivamente, planear a melhor forma de responder às dificuldades do setor. A cultura do arroz tem precisamente as características enunciadas, pois a colheita só ocorre uma vez durante o ano, excetuando algumas áreas cujas condições atmosféricas permitem duas sementeiras anuais, criando-se assim um elevado pico de oferta em alguns meses, e é um produto que necessita de um processo de secagem correto para manter as suas propriedades organoléticas (Roxo, 2024).

Por sua vez, numa unidade fabril, podem-se verificar problemas de espaço na armazenagem. Zhang et al. (2017) realizaram um estudo caso numa empresa da área alimentar. Esta empresa tem o seu desenvolvimento no processamento e embalamento de arroz, tal como se apresenta neste trabalho. Usando programação linear, procurou definir o planeamento de produção ideal e a localização dos produtos, tendo em vista a minimização dos custos totais envolvidos (reserva de espaço, movimentação de produtos

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

no espaço, produção, arranque fabril, armazenagem e inventário estagnado). As questões colocadas no presente trabalho não se apresentam tão profundas como as levantadas por Zhang et al. (2017), mas permitem analisar e identificar pontos chave para as formulações aqui propostas, tendo em conta o enquadramento operacional do caso em estudo. Contudo, perante os princípios que foram definidos, os autores usaram dados de pequenas, médias e grandes dimensões, em que estas últimas são correspondentes ao problema estudado no artigo. Identificam que se torna complicado obter resultados utilizando os dados reais, devido às dimensões e complexidade. Em todo o caso, os autores valorizam um sistema integrado como forma eficiente de coordenar o planeamento de produção e a organização do armazenamento.

Outra situação que se identifica, por inferência, na indústria orizícola é a ausência de algumas referências nas prateleiras de supermercado. Uma referência é um identificador único atribuído a um item específico, sendo usado na indústria como sinónimo de produto, pois fornece uma identificação e detalhada sobre o mesmo, sendo quase sempre reconhecido pelo SKU (*Stock Keeping Unit*). Assim, é uma ferramenta extremamente útil para a organização e eficiência operacional em qualquer negócio que lida com um vasto número de produtos, garantindo precisão e clareza na gestão de armazenagem e vendas. Por sua vez, a ausência de referência refere-se à falta de produto num espaço específico, ou seja, uma prateleira de supermercado. Tal pode ocorrer devido a, por exemplo, problemas na cadeia de abastecimento, elevada procura, falta de reposição adequada, gestão ineficiente do *stock*. Pode ainda ocorrer que um determinado produto deixe de estar presente na prateleira de supermercado por ter “saída de cardex”, a exclusão de um determinado produto, quer por decisão do fornecedor ou da empresa intermédia da venda (supermercado). Golrizgashti et al. (2023) identificou os efeitos da supressão de um determinado produto, transformando assim a dinâmica na cadeia de abastecimento. O modelo e as simulações estabelecidas demonstram que esta supressão conduz à redução de custos, mantendo a quota de mercado estável. Porém, perante uma situação de remoção de um produto, quer por decisões de *marketing*, quer por falha de uma matéria-prima base na cadeia de transformação, a resposta social tem um impacto elevado, potenciando descontentamento por parte dos clientes. Deste modo, as remoções de prateleira e os incumprimentos são sempre um aspeto crítico nas empresas.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

O último artigo que se revelou importante entre os trintas foi uma entrevista realizada por Rajib (2015) a um Diretor Executivo, chefe da Divisão de Negócio Agrícolas (ITC-ABD), da Índia. O conhecimento de como funciona o mercado agrícola neste ponto do Mundo é importante, porque, para além de ser um dos principais produtores de arroz, é também um dos locais de importação de Portugal. A presença de empresas que agregam várias produções de agricultoras permite posteriormente a venda em lotes de grandes quantidades, bem como garantir um preço mais competitivo. Estas mesmas empresas fazem uma monitorização diária do inventário, das operações associadas à compra, venda e logística.

Se, por um lado, a utilização de filtros pode auxiliar na obtenção de resultados mais específicos, pode, por outro lado, remover artigos que se encontrariam numa busca mais alargada. Um desses exemplos é o artigo de revisão de Chen et al. (2019). Para além de focar a sua atenção na perecibilidade de alimentos, resume de forma simples quais as especificidades perante um problema de planeamento de produção. Deste modo, para o desenvolvimento e resolução de um problema de planeamento é necessário saber o horizonte de planeamento; o número de produtos envolvidos; o número de passos que estão envolvidos, ou seja, se as matérias-primas são processadas em produtos finais usando uma única operação ou múltiplas operações; o número de máquinas, podendo variar de uma única máquina ou diversas em paralelo; a procura; a capacidade dos recursos, sendo estes máquinas, orçamentos, mão de obra; e a estrutura física, ou seja, trocas, tempos e dependências. Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram tidos em atenção alguns destes aspetos. O processo produtivo do problema em estudo não envolve escalonamento da produção. Caso envolvesse, o escalonamento da produção traria maior complexidade ao problema em discussão e dois aspetos adicionais que teriam de ser considerados – o agendamento das atividades (*job shop scheduling*) e o fluxo do escalonamento das atividades (*flow shop scheduling*) (Chen et al., 2019).

Na indústria alimentar, o tema de “perecibilidade de alimentos” é obrigatório. Para além de estar em causa legislações, está também em causa a segurança alimentar, a saúde e bem-estar do consumidor. Muitos dos pontos de venda já não aceitam produtos com validade a vencer a quatro meses. Para o arroz, que é um produto com elevada rotação

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

nos supermercados e hipermercados, esta situação não se revela problemática. Porém, caso se revelasse necessário, seguir-se-iam as sugestões fornecidas por Amorim et al. (2011).

Por outro lado, pode ocorrer que o foco da otimização tenha uma abordagem financeira. A integração de aspetos financeiros, como custos de aquisição, produção e armazenagem, permite às empresas tomar decisões mais fundamentadas, pois considera o impacto direto das decisões operacionais nos resultados financeiros. Deste modo, ocorrem três princípios: maximizar lucros, reduzir desperdícios e aumentar a eficiência operacional.

Em 2018, Bian et al. (2018) propõe uma abordagem nova no planeamento, envolvendo a maximização de lucro, considerando os atrasos de pagamento quer a montante, quer a jusante. Este modelo replica em grande parte situações que ocorrem no meio empresarial, em que se entra em incumprimentos monetários com fornecedores - estes incumprimentos são em parte por influência dos clientes da empresa. O modelo proposto entra em linha de conta com os atrasos nos pagamentos, em que o tempo de atraso no pagamento causa efeito de adiamento nos prazos de fabrico e no pagamento dos custos associados. Deste modo, um pequeno atraso por parte dos clientes influencia toda a cadeia de pagamentos entre fornecedores e clientes.

Embora com o foco um pouco desviado do tema em análise, atente-se no artigo de Lim et al. (2013). Esta pesquisa foca-se na maximização do lucro num processo de otimização da obtenção de energia a partir de casca de arroz, sendo este usado como biomassa. Para além disto, está presente o conceito de eficiência operacional pelo peso que é dado às localizações dos campos de arroz, o local de processamento, as fábricas de descasque externas e os centros de distribuição. Este artigo revela-se importante para salientar que, quando estão envolvidos vários fatores financeiros, basta uma pequena modificação para se dar uma sequência de consequências que alteram os resultados esperados. Como espelhado no artigo, a localização e reconfiguração do local de processamento originou um aumento de lucro, por redução de custos logísticos. Neste artigo, também é apresentado o impacto da criação de um novo centro, que desencadeou um aumento do lucro, por vendas diretas e poupança em serviços.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

A abordagem financeira auxilia na avaliação do retorno de investimentos em melhorias de processos e tecnologias, fornecendo uma justificação para o processo de tomada de decisão da alocação de recursos e priorização de projetos. Por fim, a perspetiva financeira permite também analisar segundo a rentabilidade e a sustentabilidade a longo prazo do negócio.

Na área da orizicultura, em que a compra da matéria-prima é proveniente de vários fornecedores e a produção é distribuída de forma distinta, seria importante analisar artigos que focassem esses dois assuntos, que embora possam ser separados, têm algum grau de dependência entre si. Cunha et al. (2018) abordaram a integração entre estes temas – compras, produção e logística. Analisaram as decisões de compra e produção de forma independente e tiveram em conta a presença de diversos fornecedores, com custos diferentes. Os princípios envolvidos foram os de satisfazer a procura, de reduzir os custos de aquisições e operações, quando está em causa a escolha de tarefas menos dispendiosas, de evitar custos de arranque fabril e de reduzir custos de armazenamento. Ainda que as conclusões deste artigo sejam na área da indústria química, a integração do problema de planeamento de produção de lotes e de planeamento de compra de matéria-prima contribui para a redução dos custos de produção.

Em todo o caso, no âmbito dos problemas de *lot sizing*, destaca-se o artigo de Brahimi et al. (2017) sobre formulações para vários problemas de *lot sizing* de um único produto. As formulações que são descritas para estes problemas fornecem uma base importante para a construção de formulações de problemas de *lot sizing* de vários produtos.

Deste modo, partindo dos vários princípios destacados nos artigos apresentados, o presente estudo procurará definir o melhor planeamento de compras e de produção. Tendo em conta as questões já enunciadas no capítulo anterior, o plano delineado para este trabalho será no sentido de minimizar os custos de aquisição, produção e logística, tendo em vista o auxílio numa tomada de decisão mais fundamentada.

3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

No presente capítulo, apresentam-se as formulações propostas para os problemas descritos no Capítulo 1.3 – Proposta do Presente Estudo. Relembrando que foram colocadas duas questões, a primeira focava-se no planeamento das compras e a segunda centrava-se no planeamento produtivo. Assim, foram desenvolvidas duas formulações referentes aos problemas colocadas. Quando se observa o processo, há uma ocorrência de dependência entre as duas questões, pois somente com *stock* de matéria-prima é que é assegurado *stock* de produto embalado. Porém, decidiu-se analisar o problema em duas formulações, permitindo assim que haja intervalos de tempo adaptados a cada um dos referidos problema.

Deste modo, o presente capítulo encontra-se dividido em dois sub-capítulos, um para cada sub-problema. Em primeiro lugar, será apresentada a modulação do planeamento de compras (Formulação 1), seguindo-se a formulação referente à modelação do planeamento da produção (Formulação 2).

3.1 Formulação 1: Modelação do Planeamento de Compras

A primeira formulação a ser apresentada é referente ao planeamento das compras. Para este sub-problema será considerado um horizonte temporal de um ano, no qual se fará o planeamento mensal de compras. Neste horizonte temporal pretende-se planear a compra de matéria-prima, prevenindo roturas de *stock*. O objetivo é minimizar os custos associados. Para a respetiva modelação, assume-se a possibilidade de entrada de produto em *stock* em qualquer mês do ano. Para a formulação, a variável compra para todos os produtos foi descrita tendo em conta a entrada do mesmo em armazém próprio. Por sua vez, a utilização desta ferramenta terá de ter o passo seguinte de análise na compra de produto importado em que tem tempo de trânsito associado.

Os dados mais relevantes deste sub-problema são a procura, vindo definida para cada período (mensal) e para cada tipo de arroz, o respetivo custo de aquisição e a taxa de utilização no processamento para embalamento.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Na Figura 3.1 apresenta-se um esquema que procura resumir a relação entre as variáveis e os parâmetros para a construção das restrições de conservação de fluxo de matéria-prima.

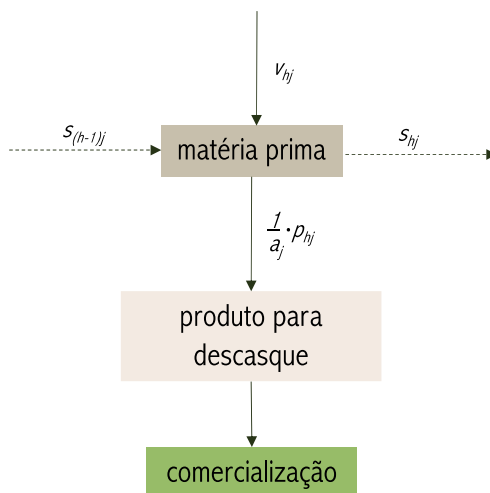


Figura 3.1 - Representação esquemática do processo de compra de matéria-prima.

Índices

m	número total de meses, $m=12$
h	índice de meses, que varia de 1 a m
j	tipo de arroz, que varia de 1 a 7, representando os tipos “agulha”, “basmati”, “carolino”, “jasmim”, “risotto”, “selvagem” e “vaporizado”, respetivamente

Parâmetros

p_{hj}	$\equiv$ procura (em toneladas) de arroz do tipo j , no mês h , para $h=1, \dots, m$, $j=1, \dots, 7$
c_{hj}	$\equiv$ custo de aquisição (em euros e por tonelada) no mês h de arroz do tipo j , para $h=1, \dots, m$, $j=1, \dots, 7$
d_h	$\equiv$ disponibilidade financeira (em euros) para as compras da totalidade de arroz (todos os tipos de arroz j , para $j=1, \dots, 7$), no mês h , para $h=1, \dots, m$;

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

- a_j $\equiv$ taxa de aproveitamento (em percentagem) da matéria-prima que se destina ao produto arroz do tipo j , para $j=1,\dots,7$; ou seja por cada tonelada de matéria-prima (destinada ao produto j), serão apenas produzidas $a_j.100$ toneladas desse tipo de arroz;
- so_j $\equiv$ stock inicial de arroz do tipo j (em toneladas), representando o stock de matéria-prima do tipo j existente antes de iniciar a presente campanha, para $h=1,\dots,m$, $j=1,\dots,7$
- sm_j $\equiv$ stock mínimo de arroz do tipo j (em toneladas) que deverá existir sempre durante o ano, para $j=1,\dots,7$
- $sm12_j$ $\equiv$ stock mínimo de arroz do tipo j (em toneladas) que deverá existir no fim da campanha, para $j=1,\dots,7$
- $camp_j$ $\equiv$ capacidade mínima de entrega de arroz do tipo j (em toneladas), $j=1,\dots,7$
- l_j $\equiv$ quantidade parcelar de entrega de arroz do tipo j (em toneladas), $j=1,\dots,7$
- M $\equiv$ quantidade máxima mensal de disponibilidade de receção de matéria-prima (em toneladas), sem restrição do tipo de arroz

Variáveis

- v_{hj} $\equiv$ quantidade comprada de arroz do tipo j a entrar em stock/armazéns próprios no mês h , para $h=1,\dots,m$, $j=1,\dots,7$
- sh_j $\equiv$ quantidade de arroz do tipo j em stock/armazém no final do mês h , para $h=1,\dots,m$, $j=1,\dots,7$
- y_{hj} $\equiv$ toma o valor 1 se houver compra de arroz do tipo j no mês h ; tomando valor 0 no caso contrário, para $h=1,\dots,m$, $j=1,\dots,7$
- y_{hj} $=$ $\begin{cases} 1 & \text{se } v_{hj} > 0 \\ 0 & \text{se } v_{hj} = 0 \end{cases}$, para $h=1,\dots,m$, $j=1,\dots,7$;
- $w1_{hj}$ $\equiv$ quantidade de lotes de arroz do tipo j a entregar no mês h , para $h=1,\dots,m$, $j=4,\dots,7$, ($w1_{hj} \in \mathbb{N}_0$);

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Considerando os parâmetros e as variáveis anteriormente definidos, propõe-se a seguinte formulação para o problema de planeamento mensal de compras de matéria-prima.

$$\text{minimizar} \quad z1 = \sum_{h=1}^m \sum_{j=1}^7 v_{hj} \cdot c_{hj} \quad (1.1)$$

sujeito a

$$s_{(h-1)j} + v_{hj} = s_{hj} + \frac{1}{a_j} \cdot p_{hj} \quad , \quad \text{para todo } h=1,\dots,m, j=1,\dots,7 \quad (1.2)$$

$$s_{hj} \geq sm_j \quad , \quad \text{para todo } h=1,\dots,m-1, j=1,\dots,7 \quad (1.3)$$

$$s_{12j} \geq sm_j \quad , \quad \text{para todo } j=1,\dots,7 \quad (1.4)$$

$$v_{hj} \geq capm_j \cdot y_{hj} \quad , \quad \text{para todo } h=1,\dots,m, j=1,\dots,7 \quad (1.5)$$

$$v_{hj} \leq M \cdot y_{hj} \quad , \quad \text{para todo } h=1,\dots,m, j=1,\dots,7 \quad (1.6)$$

$$v_{hj} = l_j \cdot w_{hj} \quad , \quad \text{para todo } h=1,\dots,m, j \in \{2,4,5,6,7\} \quad (1.7)$$

$$\sum_{j=1}^7 c_{hj} \cdot v_{hj} \leq d_h \quad , \quad \text{para todo } h=1,\dots,m, j=1,\dots,7 \quad (1.8)$$

$$v_{hj}, s_{hj} \geq 0 \quad , \quad \text{para todo } h=1,\dots,m, j=1,\dots,7 \quad (1.9)$$

$$y_{hj} \in \{0, 1\} \quad , \quad \text{para todo } h=1,\dots,m, j=1,\dots,7 \quad (1.10)$$

$$w_{hj} \in \mathbb{N}_0 \quad , \quad \text{para todo } h=1,\dots,m, j=1,\dots,7 \quad (1.11)$$

Na função objetivo (1.1), pretendemos minimizar o custo total de compras, considerando todo o horizonte de planeamento (m períodos). Para tal, considera-se o custo unitário de aquisição (c_{hj}), para cada $j=1,\dots,7$, no período h . A solução deverá privilegiar as compras em períodos de custo mais favorável, dependendo de outras limitações impostas pelas restrições que a seguir se descrevem.

As equações (1.2) garantem as condições de conservação de fluxo de matéria-prima em cada mês h e para cada tipo de arroz j , implicando assim que estas restrições estejam definidas na unidade de medida de matéria-prima. Assim, em cada mês h e para cada tipo j , para uma procura de p_{hj} toneladas de arroz do tipo j para armazenamento/embalamento,

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

terão de ser utilizadas $(1/a_j).p_{hj}$ toneladas de matéria-prima. Essa necessidade é suprida pelo arroz recebido em *stock* do mês anterior ($s_{h-1,j}$) mais o arroz recebido no mês h por via de compras (v_{hj}). O que sobra transitará em *stock* para o mês seguinte (s_{hj}). Note-se que a quantidade p_{hj} representa arroz já processado. Ao considerarmos que a unidade de medida das equações é a unidade de medida da matéria-prima, permite que as variáveis de *stock* (s_{hj}) representem *stock* de matéria-prima.

As restrições (1.3) estabelecem um limite mínimo mensal para o *stock* de arroz do tipo j (sm_j), ao longo de todo o horizonte de planeamento, exceto no último mês, sendo esse garantido pelas restrições (1.4).

As restrições (1.4) garantem que o *stock* no final do horizonte de planeamento (final do ano) seja de pelo menos sm_j toneladas, para cada tipo de arroz j , para cada $j=1, \dots, 7$.

As inequações (1.5) e (1.6) estabelecem uma quantidade mínima para o fornecimento mensal de matéria-prima do produto j , caso haja entrega desse produto, para cada $j=1, \dots, 7$. O parâmetro M representa uma constante suficientemente grande, não limitando a variável v_{hj} .

As restrições (1.7) garantem que a entrega mensal de matéria-prima do tipo j respeita lotes com dimensões pré-definidas, ou seja, as quantidades entregues são múltiplos da dimensão de cada lote. Os lotes são definidos para cada tipo de produto. Este padrão é imposto apenas aos produtos $j = 2, 4, 5, 6$ e 7 .

As inequações (1.8) estabelecem o limite máximo orçamental mensal relativamente à despesa total com a aquisição de matéria-prima. Procura-se assim que as soluções respeitem os limites mensais de tesouraria da empresa.

Por fim, as condições (1.9) a (1.11) são condições de domínio das variáveis.

3.2 Formulação 2: Modelação do Planeamento da Produção

A segunda formulação refere-se ao planeamento da produção. Observando o processo fabril, observam-se desde logo alguns pontos importantes relacionados com a informação que é indispensável para a modelação do problema, tendo sido identificados como pontos mais críticos as fases de transformação e embalagem. Esta formulação pretende minimizar as perdas de negócio, ou seja, procura não satisfeita, garantindo que não há rotura de *stock*. Adicionalmente, deseja-se que haja o menor número de mudanças de produto.

Para esta modelação, assumiram-se as duas fases do processo: primeiramente o processo de transformação de matéria-prima, em que esta segue ou para silos de embalagem ou para *big-bags*; e, de seguida, o processo de embalagem de produto descascado para produto embalado. Esta segunda fase é alimentada pela fase anterior, quer da matéria-prima que segue para silos (por $x1_{tj}$), quer da que segue para *big-bags* (por $x2_{tj}$). Por esse motivo, os dois processos podem ser executados em paralelo. A Figura 3.2 esquematiza o processo produtivo.

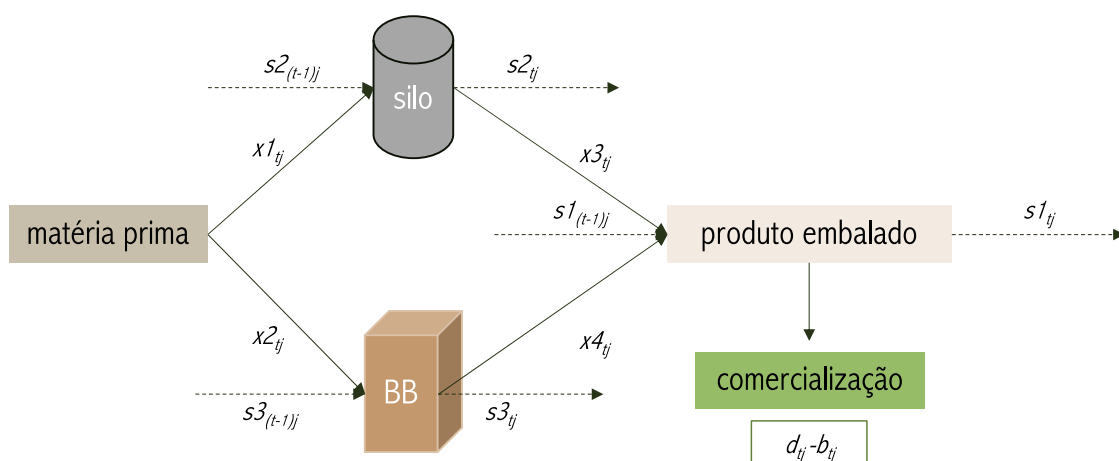


Figura 3.2 - Representação esquemática do processo entre matéria-prima, produto descascado e armazenado (silos ou *big-bags*, na imagem BB) e embalado.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

O problema é fortemente condicionado pela procura, definida nos parâmetros d_{ij} , tendo sempre em conta que os diferentes tipos de arroz, bem como o estado de entrada, influenciam este parâmetro. Neste problema, o horizonte temporal é de um mês, sendo decomposto em períodos diários.

A seguir descrevem-se os índices, os parâmetros e definem-se as variáveis que irão ser consideradas na Formulação 2.

Índices

n	número total de dias, $n=30$
t	índice de dias, que varia de 1 a n
j	tipo de arroz, que varia de 1 a 7, representando os tipos “agulha”, “basmati”, “carolino”, “jasmim”, “risotto”, “selvagem” e “vaporizado”, respetivamente

Parâmetros

d_{tj}	$\equiv$ procura (em toneladas) de arroz do tipo j , no dia t , para $t=1,\dots,n$, $j=1,\dots,7$
$s1_{0j}$	$\equiv$ stock inicial (em toneladas) de produto embalado, representando o stock de arroz do tipo j recebido no dia 1, $j=1,\dots,7$
$s2_{0j}$	$\equiv$ stock inicial (em toneladas) de produto em silos, representando o stock de arroz do tipo j recebido no dia 1, $j=1,\dots,7$
$s3_{0j}$	$\equiv$ stock inicial (em toneladas) de produto em <i>big-bag</i> , representando o stock de arroz do tipo j recebido no dia 1, $j=1,\dots,7$
$ls1_{nj}$	$\equiv$ stock mínimo final (em toneladas) de produto embalado, representando o stock de arroz do tipo j gerado no final do dia n , $j=1,\dots,7$
$ls2_{nj}$	$\equiv$ stock mínimo final (em toneladas) de produto em silos, representando o stock de arroz do tipo j gerado no final do dia n , $j=1,\dots,7$
$ls3_{nj}$	$\equiv$ stock mínimo final (em toneladas) de produto em <i>big-bag</i> , representando o stock de arroz do tipo j gerado no final do dia n , $j=1,\dots,7$
$c11_j$	$\equiv$ tempo total de processamento por tonelada (em minutos) de arroz do tipo j , desde a matéria-prima até aos silos, $j=1,\dots,7$

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

$c12_j$	$\equiv$	tempo de embalagem, agrupamento e paletização por tonelada (em minutos) de arroz do tipo j proveniente dos silos, $j=1,\dots,7$
$c21_j$	$\equiv$	tempo total de processamento por tonelada (em minutos) de arroz do tipo j , desde a matéria-prima até <i>big-bags</i> , $j=1,\dots,7$
$c22_j$	$\equiv$	tempo total de embalagem, agrupamento e paletização por tonelada (em minutos) do arroz do tipo j proveniente de <i>big-bags</i> , $j=1,\dots,7$
h_j	$\equiv$	tempo de limpeza após finalização de processamento de arroz do tipo j , $j=1,\dots,7$
tt	$\equiv$	tempo total de laboração diário;
$M1_j$	$\equiv$	quantidade máxima diária do descasque de arroz do tipo j (em toneladas), $j=1,\dots,7$ (podendo-se considerar $M1_j = tt / (\min\{c11_j, c21_j\})$)
m_j	$\equiv$	quantidade mínima diária de arroz do tipo j para ativar o processo (em toneladas), excluindo <i>big-bag</i> $\rightarrow$ embalagem, $j=1,\dots,7$
$M2_j$	$\equiv$	quantidade máxima diária do embalagem de arroz do tipo j (em toneladas), $j=1,\dots,7$ (podendo-se considerar $M2_j = tt / (\min\{c12_j, c22_j\})$)
p_j	$\equiv$	percentagem mínima de processamento mensal de arroz do tipo j , relativamente ao volume total mensal da procura (em percentagem), $j=1,\dots,7$
q_j	$\equiv$	relevância/prioridade (valor entre 0 e 1) do processamento de arroz do tipo j , $j=1,\dots,7$
$g1_{tj}$	$\equiv$	controla a operacionalidade do descasque (= 1 se permitir produção, = 0 senão), no dia t do arroz do tipo j , para $t=1,\dots,n$, $j=1,\dots,7$
$g2_{tj}$	$\equiv$	controla a operacionalidade do embalagem (= 1 se permitir produção, = 0 senão), no dia t do arroz do tipo j , para $t=1,\dots,n$, $j=1,\dots,7$
ms	$\equiv$	capacidade máxima de cada silo (em toneladas)
mbb	$\equiv$	capacidade máxima total do armazenamento em <i>big-bags</i> (em toneladas)

Variáveis

$x1_{tj}$	$\equiv$	quantidade produzida no dia t de arroz do tipo j , desde matéria-prima até aos silos, para $t=1,\dots,n$, $j=1,\dots,7$
$x2_{tj}$	$\equiv$	quantidade produzida no dia t de arroz do tipo j , desde matéria-prima até <i>big-bag</i> , para $t=1,\dots,n$, $j=1,\dots,7$

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

x_{3tj} $\equiv$ quantidade embalada no dia t de arroz do tipo j , desde silos até ao embalamento, para $t=1,\dots,n$, $j=1,\dots,7$

x_{4tj} $\equiv$ quantidade embalada no dia t de arroz do tipo j , desde *big-bag* até ao embalamento, para $t=1,\dots,n$, $j=1,\dots,7$

s_{1tj} $\equiv$ stock de arroz embalado do tipo j no final do dia t , para $t=1,\dots,n$, $j=1,\dots,7$

s_{2tj} $\equiv$ stock de arroz em silos do tipo j no final do dia t , para $t=1,\dots,n$, $j=1,\dots,7$

s_{3tj} $\equiv$ stock de arroz em *big-bag* do tipo j no final do dia t , para $t=1,\dots,n$, $j=1,\dots,7$

b_{tj} $\equiv$ procura não satisfeita de arroz do tipo j no dia t , para $t=1,\dots,n$, $j=1,\dots,7$

y_{1tj} $= \begin{cases} 1 & \text{se } x_{tj} > 0 \\ 0 & \text{se } x_{tj} = 0 \end{cases}$, para $t=1,\dots,n$, $j=1,\dots,7$

y_{2tj} $= \begin{cases} 1 & \text{se houver necessidade de limpeza após processamento do tipo } j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$

no dia t , para $t=1,\dots,n$, $j=1,\dots,7$

w_{tj} $= \begin{cases} 1 & \text{se a limpeza de arroz do tipo } j \text{ puder ser evitada no dia } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$

para $t=1,\dots,n$, $j=1,\dots,7$

r_{tji} $= \begin{cases} 1 & \text{se o silo } i \text{ contém arroz do tipo } j \text{ no dia } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$

para $t=1,\dots,n$, $j=1,\dots,7$, $i=1,\dots,8$.

Considerando os parâmetros e os conjuntos de variáveis anteriormente definidos, propõe-se a seguinte formulação para o problema de planeamento mensal de produção.

De modo a responder ao objetivo de não haver perdas de negócio, procurou-se reduzir o número de incumprimentos, em função da procura dos vários arrozes embalados, ou seja, os produtos j .

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

$$\text{minimizar} \quad z2 = \sum_{t=1}^n \sum_{j=1}^7 q_j \cdot b_{tj} + 0,01 \sum_{t=1}^n \sum_{j=1}^7 y2_{tj} + 0,0001 \sum_{t=1}^n \sum_{j=1}^7 x2_{tj} \quad (2.1)$$

sujeito a

$$s2_{(t-1)j} + x1_{tj} = x3_{tj} + s2_{tj} \quad , \quad \text{para todo } t=1,\dots,n, j=1,\dots,7 \quad (2.2)$$

$$s3_{(t-1)j} + x2_{tj} = x4_{tj} + s3_{tj} \quad , \quad \text{para todo } t=1,\dots,n, j=1,\dots,7 \quad (2.3)$$

$$s1_{(t-1)j} + x3_{tj} + x4_{tj} = (d_{tj} - b_{tj}) + s1_{tj} \quad , \quad \text{para todo } t=1,\dots,n, j=1,\dots,7 \quad (2.4)$$

$$b_{tj} \leq d_{tj} \quad , \quad \text{para todo } t=1,\dots,n, j=1,\dots,7 \quad (2.5)$$

$$\sum_{j=1}^7 c11_j \cdot x1_{tj} + \sum_{j=1}^7 c21_j \cdot x2_{tj} + \sum_{j=1}^7 h_j \cdot y2_{tj} \leq tt \quad , \quad \text{para todo } t=1,\dots,n \quad (2.6)$$

$$\sum_{j=1}^7 c12_j \cdot x3_{tj} + \sum_{j=1}^7 c22_j \cdot x4_{tj} \leq tt \quad , \quad \text{para todo } t=1,\dots,n \quad (2.7)$$

$$s1_{nj} \geq ls1_{nj} \quad , \quad \text{para todo } j=1,\dots,7 \quad (2.8)$$

$$s2_{nj} \geq ls2_{nj} \quad , \quad \text{para todo } j=1,\dots,7 \quad (2.9)$$

$$s3_{nj} \geq ls3_{nj} \quad , \quad \text{para todo } j=1,\dots,7 \quad (2.10)$$

$$\sum_{j=1}^7 s2_{(t-1)j} + \sum_{j=1}^7 x1_{tj} \leq ms \cdot \sum_{j=1}^7 \sum_{i=1}^8 r_{tji} \quad , \quad \text{para todo } t=1,\dots,n \quad (2.11)$$

$$s2_{(t-1)j} + x1_{tj} \leq ms \cdot \sum_{j=1}^7 \sum_{i=1}^8 r_{tji} \quad , \quad \text{para todo } t=1,\dots,n, j=1,\dots,7 \quad (2.12)$$

$$8 \cdot (s2_{(t-1)j} + x1_{tj}) \geq \sum_{i=1}^8 r_{tji} \quad , \quad \text{para todo } t=1,\dots,n, j=1,\dots,7 \quad (2.13)$$

$$\sum_{j=1}^7 r_{tji} \leq 1 \quad , \quad \text{para todo } t=1,\dots,n, i=1,\dots,8 \quad (2.14)$$

$$\sum_{j=1}^7 s3_{tj} \leq mbb \quad , \quad \text{para todo } t=1,\dots,n \quad (2.15)$$

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

$$\sum_{t=1}^n x_{3tj} + \sum_{t=1}^n x_{4tj} \geq p_j \left(\sum_{t=1}^n d_{tj} \right) + p_j (ls_{1nj} - s_{10j}) ,$$

para todo $j=1, \dots, 7$ (2.16)

$$x_{1tj} + x_{2tj} \leq M_{1j} \cdot y_{1tj} , \text{ para todo } t=1, \dots, n, j=1, \dots, 7 \quad (2.17)$$

$$x_{1tj} + x_{2tj} \geq m_j \cdot y_{1tj} , \text{ para todo } t=1, \dots, n, j=1, \dots, 7 \quad (2.18)$$

$$x_{1tj} + x_{2tj} \leq M_{1j} \cdot (y_{2tj} + w_{tj}) , \text{ para todo } t=1, \dots, n-1, j=1, \dots, 7 \quad (2.19)$$

$$x_{1tj} + x_{2tj} \leq M_{1j} \cdot y_{2tj} , \text{ para todo } t=n, j=1, \dots, 7 \quad (2.20)$$

$$x_{1tj} + x_{2tj} \geq m_j \cdot y_{2tj} , \text{ para todo } t=1, \dots, n, j=1, \dots, 7 \quad (2.21)$$

$$2 \cdot w_{tj} \leq y_{1tj} + y_{1(t+1)j} , \text{ para todo } t=1, \dots, n-1, j=1, \dots, 7 \quad (2.22)$$

$$w_{(t-1)j} + w_{tj} \leq 5 - \left(y_{1(t-1)j} + y_{1tj} + y_{1(t+1)j} + \frac{1}{6} \left(\sum_{r=1, r \neq j}^7 y_{1tr} \right) \right) ,$$

para todo $t=2, \dots, n-1, j=1, \dots, 7$ (2.23)

$$\sum_{j=1}^7 w_{tj} \leq 1 , \text{ para todo } t=1, \dots, n-1 \quad (2.24)$$

$$y_{1tj} \leq g_{1tj} , \text{ para todo } t=1, \dots, n, j=1, \dots, 7 \quad (2.25)$$

$$x_{3tj} + x_{4tj} \leq M_{2j} \cdot g_{2tj} , \text{ para todo } t=1, \dots, n, j=1, \dots, 7 \quad (2.26)$$

$$x_{1tj}, x_{2tj}, x_{3tj}, x_{4tj}, s_{1tj}, s_{2tj}, s_{3tj}, b_{tj} \geq 0 ,$$

para todo $t=1, \dots, n, j=1, \dots, 7$ (2.27)

$$y_{1tj}, y_{2tj} \in \{0, 1\} , \text{ para todo } t=1, \dots, n, j=1, \dots, 7 \quad (2.28)$$

$$w_{tj} \in \{0, 1\} , \text{ para todo } t=1, \dots, n-1, j=1, \dots, 7 \quad (2.29)$$

$$r_{tji} \in \{0, 1\} , \text{ para todo } t=1, \dots, n, j=1, \dots, 7, i=1, \dots, 8 \quad (2.30)$$

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Na função objetivo (2.1) pretendemos minimizar a procura não satisfeita, ponderada com os pesos q_j , para cada $j=1, \dots, 7$. Estes pesos permitem diferenciar a relevância das perdas de cada tipo de arroz. Quanto maior o valor de q_j , maior relevância terá a não satisfação de encomendas desse tipo de arroz. Em segundo plano, e depois de dar prioridade à minimização das perdas, pretende-se também minimizar o número de limpezas (y_{2tj}). Este termo só é diferenciador entre soluções ótimas alternativas da função definida em primeiro plano, referente à minimização das perdas, motivo pelo qual o coeficiente na função objetivo é muito baixo (0,01). Ainda em coeficiente m segundo plano, pretende-se também penalizar a quantidade de arroz a serem processadas para *big-bags* (x_{2tj}), sendo, neste caso, ponderadas na função objetivo com coeficiente ainda mais baixo (0,0001). A ponderação mais penalizadora das variáveis x_{2tj} relativamente às variáveis y_{2tj} deve-se ao facto de as variáveis x_{2tj} serem contínuas não-negativas e as variáveis y_{2tj} serem binárias, não ultrapassando o valor 1.

As equações (2.2) estabelecem as condições de conservação de fluxo do produto em silos, garantindo, em cada dia t e para cada tipo de arroz j , que o arroz produzido para silos (x_{1tj}) mais o arroz armazenado em silos ($s_{2(t-1)j}$) deve corresponder ao arroz em silos que irá ser embalado nesse dia (x_{3tj}) e o que sobra mantém-se em *stock* (silos) transitando para o dia seguinte (s_{2tj}).

As equações (2.3) estabelecem as condições de conservação de fluxo do produto em *big-bags*, garantindo, em cada dia t e para cada tipo de arroz j , que o arroz produzido para *big-bags* (x_{2tj}) mais o arroz em *big-bags* em armazém ($s_{3(t-1)j}$) deve corresponder ao arroz em *big-bags* que irá ser embalado nesse dia (x_{4tj}) e o que sobra mantém-se em *stock* (*big-bags*) transitando para o dia seguinte (s_{3tj}).

As equações (2.4) estabelecem as condições de conservação de fluxo do produto embalado, garantindo, em cada dia t e para cada tipo de arroz j , que o arroz disponível ($s_{1(t-1)j} + x_{3tj} + x_{4tj}$) corresponde ao que satisfaz a procura (procura total menos procura não satisfeita ($d_{tj} - b_{tj}$)) e ao que transitará em *stock* para o dia seguinte (s_{1tj}).

As restrições (2.5) garantem que, em cada dia t e para cada tipo j , o incumprimento máximo não pode ultrapassar a procura total desse tipo de arroz no dia t .

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

As desigualdades (2.6) garantem, para cada dia t , que o tempo total utilizado na produção dos tipos em laboração nesse dia (quer para embalagem, quer para *big-bags*) mais os tempos de limpeza não podem ultrapassar o tempo total disponível para laboração nesse dia (tt , definido como 8 horas). O processo aqui tratado envolve a limpeza (do arroz), o descasque, a separação, o branqueamento, etc.

As desigualdades (2.7) garantem, para cada dia t , que o tempo total utilizado no processo de embalagem do arroz proveniente de silos e de *big-bags* não pode ultrapassar o tempo total disponível para laboração nesse dia (tt , definido como 8 horas). Note-se que este processo (embalamento a partir de silos e de *big-bags*) funciona em paralelo com o processo de tratamento caracterizado nas restrições (2.6).

As restrições (2.8), (2.9) e (2.10) garantem que, para cada tipo de arroz j , o *stock* de arroz embalado, o *stock* de arroz em silos e o *stock* de arroz em *big-bags*, no último dia (n) será igual ou superior a $ls1_{nj}$, a $ls2_{nj}$ e a $ls3_{nj}$, respetivamente, garantindo um limite mínimo de arroz do tipo j (embalado, em silos e em *big-bags*) que transitará em *stock* para o mês seguinte.

As restrições (2.11) garantem que, em cada dia, todo o volume de arroz (de todos os tipos) acumulado em silos nesse dia, correspondendo ao *stock* recebido mais o que é produzido nesse dia, não pode ultrapassar a capacidade máxima total dos silos.

As restrições (2.12) obrigam a sinalizar a presença de arroz do tipo j em silos se houver produção desse tipo de arroz no dia t ou se na véspera já houvesse arroz desse tipo em algum dos silos.

As restrições (2.13) garantem que, em cada dia, se houver silos ocupados com arroz do tipo j (recebido de véspera ou descascado para silos nesse dia), então terá de haver arroz do tipo j em *stock* nesse mesmo dia.

As restrições (2.14) garantem que, em cada dia e em cada silo, há apenas um tipo de arroz.

As restrições (2.15) garantem, em cada dia, que a quantidade total de arroz armazenamento em *big-bags* não ultrapassa a capacidade máxima total de armazenamento estabelecida (mbb).

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

As inequações (2.16) garantem que, para cada tipo de arroz j , a produção total mensal (arroz produzido diretamente para embalamento mais o arroz embalado a partir de *big-bags*, ao longo do mês), incluindo o arroz que recebemos em *stock* no início do mês menos o que teremos de gerar (embalado) no final do mês para transitar para o mês seguinte, digamos, o volume total de arroz do tipo j disponível para entregar aos clientes, é no mínimo igual a p_j (%) desse volume total.

As restrições (2.17) e (2.18) estabelecem o mecanismo que caracteriza as variáveis binárias y_{1tj} , tomando valor 1 se houver produção de arroz do tipo j no dia t (quer o arroz produzido para silos, quer o arroz produzido para *big-bags*); e tomando valor 0 no caso contrário. Consequentemente, as restrições (2.18) garantem ainda que se houver produção do tipo j (para silos ou *big-bags*), essa produção será no mínimo de m_j (em cada dia). Logo, as variáveis y_{1tj} serão importantes também para indicar em que dias há, ou não, produção do tipo j , sendo fundamentais para as caracterizações que irão ser definidas nas restrições (2.22) e (2.23).

As desigualdades (2.19) e (2.21) estabelecem, desta vez, o mecanismo de funcionamento das variáveis y_{2tj} , obrigando à realização de limpeza no dia t se nesse dia houver produção do tipo j (restrições (2.19)); e fechando a realização de limpeza se não houver produção do tipo j (restrições (2.21)), considerando a produção quer a que vai para *big-bags* quer a que vai para embalamento. Este mecanismo de obrigatoriedade de limpeza (representado pelas variáveis y_{2tj}) é dispensado se se verificar alguma das condições estabelecidas nas desigualdades (2.22) a (2.24), caracterizado nas variáveis w_{tj} . Assim, se no dia t houver produção do tipo j (para *big-bags* ou embalamento) e se a respetiva limpeza puder ser dispensada, então $w_{tj} = 1$, permitindo que y_{2tj} seja 0, concretizando a referida dispensa. Note-se que mesmo que $w_{tj} = 1$, as desigualdades (2.19) continuam válidas caso y_{2tj} seja igual a 1, mostrando que o conjunto de soluções admissíveis contém essa solução indesejável. Porém, essa solução, apesar de admissível, não integrará o conjunto de soluções candidatas a ótimas, tendo em conta as restrições de capacidade (2.6), as restrições (2.4) e a função objetivo, para além das restrições de domínio.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

As restrições (2.20) caracterizam o mesmo que as (2.19), mas para o caso particular do dia n , para o qual não existe a possibilidade de dispensar limpezas, não havendo, por esse motivo, variáveis w_{tj} .

As restrições (2.22) garantem que só pode haver dispensa de limpeza do produto do tipo j no dia t ($w_{tj}=1$) se houver produção desse mesmo produto dia t e no dia seguinte ($t+1$).

As restrições (2.23) não permitem que a dispensa da limpeza do tipo j possa ocorrer nos dois dias $t-1$ e t se, havendo produção do tipo j nos dias $t-1$, t e $t+1$, houver adicionalmente produção de pelo menos um outro tipo (que não j) no dia t ; nesse caso, a dispensa de limpeza pode ocorrer no máximo num dos dias, ou $t-1$ ou t ($w_{(t-1)j} = 1$ (caso a) ou $w_{tj} = 1$ (caso b)), como apresentado na Figura 3.3.

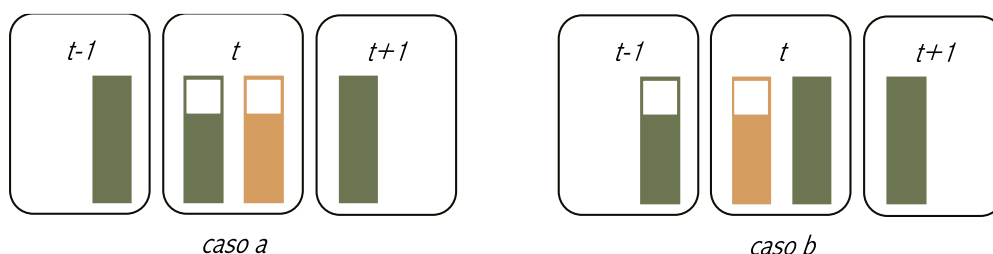


Figura 3.3 - Representação visual do mecanismo de limpezas.

Usando o esquema na Figura 3.3, apesar de haver produção do tipo verde nos três dias $t-1$, t e $t+1$, como existe produção também de um outro tipo no dia t , a produção do tipo verde no dia t está “colada” à do dia $t-1$ (caso a) ou à do dia t (caso b), mas não pode estar colada às duas porque tem de haver limpeza para a produção do tipo bege. Isto significa que, ou a limpeza do tipo verde é feita no dia $t-1$ (se o tipo verde do dia t estiver “colado” à do dia $t+1$, caso b), ou a limpeza é feita no dia t (se o tipo verde do dia t estiver “colado” ao do dia $t-1$, caso a).

Note-se que, apesar do esforço de evitar limpezas desnecessárias, poderão ocorrer soluções sem este aspeto devidamente respeitado. Isso ocorrerá se houver um dia sem produção (sem descasque). Poderá ocorrer também se a restrição de limitação de tempo (inequações (2.6)) tiverem folga. Nesse caso, a solução pode propor fazer limpeza, ainda

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

que desnecessariamente, apenas porque sobrou tempo para isso. Estes aspetos mereceriam ser corrigidos para que a solução final obtida correspondesse de imediato ao plano a executar. Por esse motivo, foram penalizadas na função objetivo as variáveis y_{2ij} , procurando evitar limpezas desnecessárias (redundantes), sem interferir com a minimização das perdas de comercialização.

As restrições (2.24) estabelecem que, em cada dia t , haverá dispensa de limpeza de no máximo um tipo j .

As inequações (2.25) e (2.26) permitem controlar o processo produtivo para os silos e para *big-bags* (restrições (2.25)) e a transferência de silos e *big-bags* para embalamento (restrições (2.26)), respetivamente. Os parâmetros binários g_{1ij} e g_{2ij} são dados e tomam valor 1 se houver produção ou embalamento, respetivamente. Desta forma, estas restrições permitem fechar a produção de algum tipo de arroz em algum dia e permitem fechar o embalamento de algum tipo de arroz e também em algum dia. O parâmetro M_{2j} funciona como uma constante suficientemente grande para alavancar o parâmetro binário g_{2ij} .

As restrições (2.27) a (2.30) representam as condições de domínio das variáveis envolvidas na formulação.

As restrições (2.21) são redundantes na formulação, servindo apenas para fortalecer a respetiva relaxação linear.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A área de planeamento necessita de dados específicos para estruturar o problema, descrever o sistema em análise e definir as variáveis, restrições e objetivos do modelo de otimização. Face ao problema apresentado, os dados focam-se em informações como a procura, a capacidade, os tempos de processamento, os recursos disponíveis, as restrições operacionais, entre outros. É importante referir que, no presente trabalho, foram usados valores aproximados para garantir a integridade e a privacidade dos dados da empresa.

As formulações descritas anteriormente foram construídas em folha de cálculo Microsoft Excel, sendo resolvidas usando o OpenSolver. Esta aplicação, desenvolvida por Andrew Mason é um suplemento gratuito para Microsoft Excel, que permite realizar análises de otimização de forma acessível e eficiente (Mason, 2012). A formulação construída na folha de cálculo é introduzida na aplicação OpenSolver e facilita a utilização e as alterações que possam vir a ser consideradas nos parâmetros do modelo. Ao ser desenhado para Microsoft Excel, é funcional para Windows e macOS. Definiu-se um limite de tempo de 100 segundos para a resolução da Formulação 1 e de 150 segundos para a resolução da Formulação 2. Adicionalmente, considerou-se uma tolerância de 0.01% de erro do Branch and Bound.

No presente capítulo iremos considerar um conjunto de cenários hipotéticos, procurando analisar casos que se aproximem da realidade dos problemas em estudo. Desta forma, todo este procedimento proporciona uma ferramenta útil de análise e de apoio ao processo de tomada de decisão. Embora as duas formulações não estejam interligadas, não se pode dissociar que a procura de um determinado mês da Formulação 1 (p_{hj}) pode significar a totalidade da procura mensal da Formulação 2 (d_{ij}). Contudo, o único índice usado em ambas as formulações é referente ao tipo de arroz, representado por j .

Assim, a Tabela 4.1 apresenta a informação relativa a cada tipo de arroz face à especificidade do estado de entrada da matéria-prima em ambiente fabril. Paralelamente e de forma a ser mais perceptível, no decorrer dos próximos capítulos e sempre que se verificar necessário, os vários tipos de arroz serão indicados pela sua inicial, sempre com a mesma cor, tal como se apresenta na Tabela 4.1.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Tabela 4.1 - Tabela de informação do estado de entrada dos arrozes presentes na Formulação 1 e 2, com a cor identificativa do arroz.

Arroz	Arroz em Casca	Arroz em Película	Arroz Branqueado	Cores
<i>Agulha (A)</i>		x		
<i>Basmati (B)</i>			x	
<i>Carolino (C)</i>	x			
<i>Jasmim (J)</i>			x	
<i>Risotto (R)</i>	x			
<i>Selvagem (S)</i>			x	
<i>Vaporizado (V)</i>		x		

4.1 Formulação 1

Na procura de resposta para qual o melhor planeamento de compras de forma a não haver rotura de *stock*, foi construída a Formulação 1. Os resultados e conclusões serão apresentados neste subcapítulo. A resposta para este problema será apresentada sob a forma de vários cenários: cenário base, cenário com o aumento e a diminuição de procura.

No desenvolvimento do problema, há valores que serão mantidos nos diferentes cenários, sendo apresentado nas Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4. A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros usados na Formulação 1 e a Tabela 4.3 mostra os custos mensais de aquisição, em euros, de matéria-prima (c_{hj}).

Tabela 4.2 - Parâmetros usados na Formulação 1.

Parâmetros		A	B	C	J	R	S	V
Stock inicial (ton)	s_{0j}	450	275	450	160	75	60	130
Stock mínimo mensal (ton)	sm_j	430	200	450	150	65	50	120
Lote de entrega (ton)	$lote_j$	0	25	0	25	25	25	25
Capacidade mínima de entrega (ton)	$capm_j$	2000	25	2	25	25	25	25
Stock final (ton)	s_{nj}	430	200	450	150	65	50	120
Taxa de aproveitamento da mat-prima (%)	a_j	0.9	0.95	0.7	0.95	0.7	1	0.9

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Tabela 4.3 - Tabela dos custos de aquisição mensal em euros (€) da matéria-prima.

<i>Custos de aquisição</i> C_{hj}		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>J</i>	<i>R</i>	<i>S</i>	<i>V</i>
<i>Meses</i> h	1	630.0	1250.0	630.0	850.0	800.0	1250.0	680.0
	2	630.0	1250.0	635.0	850.0	820.0	1250.0	700.0
	3	630.0	1250.0	640.0	850.0	840.0	1250.0	720.0
	4	630.0	1250.0	645.0	850.0	830.0	1250.0	680.0
	5	630.0	1250.0	650.0	850.0	810.0	1250.0	700.0
	6	630.0	1250.0	655.0	850.0	800.0	1250.0	720.0
	7	630.0	1250.0	660.0	850.0	830.0	1250.0	740.0
	8	630.0	1250.0	665.0	850.0	850.0	1250.0	760.0
	9	630.0	1250.0	670.0	850.0	840.0	1250.0	780.0
	10	630.0	1250.0	675.0	850.0	820.0	1250.0	800.0
	11	630.0	1250.0	680.0	850.0	820.0	1250.0	820.0
	12	630.0	1250.0	685.0	850.0	810.0	1250.0	840.0

Na Tabela 4.3, durante os doze meses para alguns dos sete produtos, os custos de aquisição não se mantêm constantes, replicando assim condições que se verificam em cenário real. Tal como foi referido em relação aos valores de procura em que foram usados valores aproximados, também os valores de custo seguem o mesmo princípio.

A Tabela 4.4 apresenta a disponibilidade financeira máxima, em euros, (d_h) para cada mês.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Tabela 4.4 - Tabela de informação da disponibilidade financeira máxima em euros (€) por cada mês.

<i>Disponibilidade financeira máxima</i> d_h	
Meses	1
	3 000 000
	2
	1 500 000
	3
	1 500 000
	4
	1 500 000
	5
	1 050 000
	6
	1 050 000
	7
	1 050 000
	8
	1 050 000
	9
	1 030 000
	10
	1 030 000
	11
	1 000 000
	12
	1 000 000

4.1.1 Cenário A1: Dados Base

Tal como descrito no capítulo anterior, a Formulação 1 foi estabelecida para uma procura anual. De forma a ser testada, tornou-se importante definir os valores de procura para os diferentes tipos de arroz e para os vários meses (p_{hj}). Assim, a Figura 4.1 esquematiza a procura delineada para os valores apresentados na Tabela 4.5.

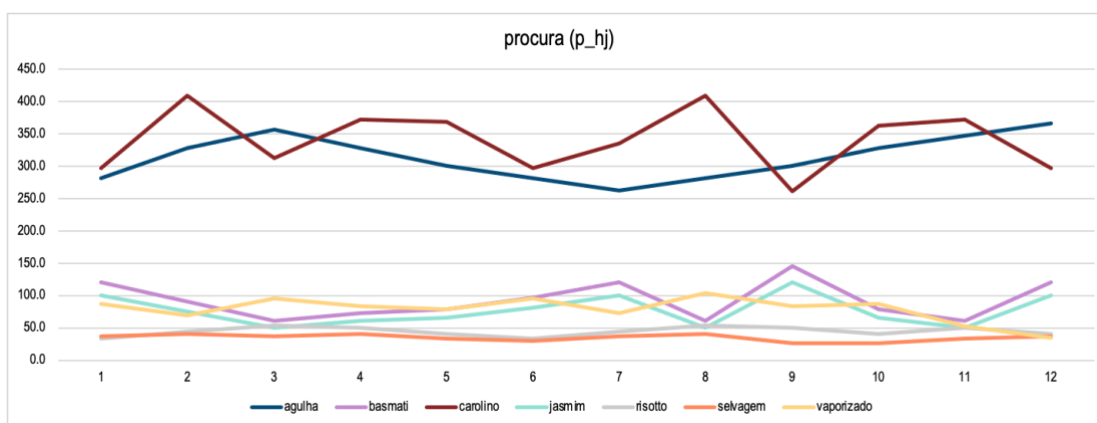


Figura 4.1 - Representação gráfica da procura para o cenário base da Formulação 1.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Tabela 4.5 - Tabela de procura em toneladas de arroz para o cenário base da Formulação 1.

<i>Procura</i> <i>p_{hj}</i>		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>J</i>	<i>R</i>	<i>S</i>	<i>V</i>
<i>Meses</i>	1	281.2	121.0	297.3	100.7	33.7	37.0	87.0
	2	328.0	90.8	408.9	75.6	43.9	40.6	69.5
	3	356.2	60.5	312.2	50.3	54.0	37.0	95.2
	4	328.0	72.3	371.7	60.4	50.6	40.6	83.5
	5	299.9	78.6	368.3	65.5	40.5	33.2	78.2
	6	281.2	96.1	297.3	80.6	33.7	29.6	95.2
	7	262.4	120.7	334.6	100.7	43.9	37.0	73.0
	8	281.2	60.4	408.9	50.3	54.0	40.6	104.3
	9	299.9	145.3	261.6	120.9	50.6	25.8	83.5
	10	328.0	78.6	362.6	65.5	40.5	25.8	86.7
	11	346.8	60.5	371.7	50.3	50.6	33.2	52.1
	12	365.5	121.0	297.3	100.7	40.5	37.0	34.8

Partindo desta procura e tendo em vista a redução máxima de despesas, a resposta da função objetivo é 10416306 euros, implicando a compra de 14327.2 ton. Neste sentido, na Tabela 4.6 pretende-se resumir as compras a realizar, adicionando ainda a informação do número de lotes envolvidos para os produtos que o justificam. A Figura 4.2 apresenta em gráfico as compras de matéria-prima.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Tabela 4.6 - Tabela resumo das compras de matéria-prima e o número de lotes associados na matéria-prima basmati, jasmim, risotto, selvagem e vaporizado.

Compras v_{ij}		A		B		C		J		R		S		V	
Meses	1	2017.8	-	75.0	3	1715.1	-	100.0	4	275.0	11	50.0	2	275.0	11
	2	0.0	-	75.0	3	2031.5	-	100.0	4	0.0	0	25.0	1	0.0	0
	3	0.0	-	150.0	6	1771.5	-	100.0	4	0.0	0	75.0	3	0.0	0
	4	2138.1	-	0.0	0	0.0	-	0.0	0	0.0	0	0.0	0	225.0	9
	5	0.0	-	75.0	3	328.2	-	100.0	4	50.0	2	125.0	5	550.0	22
	6	0.0	-	100.0	4	0.0	-	50.0	2	450.0	18	25.0	1	0.0	0
	7	0.0	-	125.0	5	0.0	-	150.0	6	0.0	0	0.0	0	0.0	0
	8	0.0	-	400.0	16	0.0	-	50.0	2	0.0	0	25.0	1	0.0	0
	9	0.0	-	0.0	0	0.0	-	175.0	7	0.0	0	0.0	0	0.0	0
	10	0.0	-	25.0	1	0.0	-	0.0	0	0.0	0	50.0	2	0.0	0
	11	0.0	-	25.0	1	0.0	-	50.0	2	0.0	0	50.0	2	0.0	0
	12	0.0	-	50.0	2	0.0	-	100.0	4	0.0	0	0.0	0	0.0	0

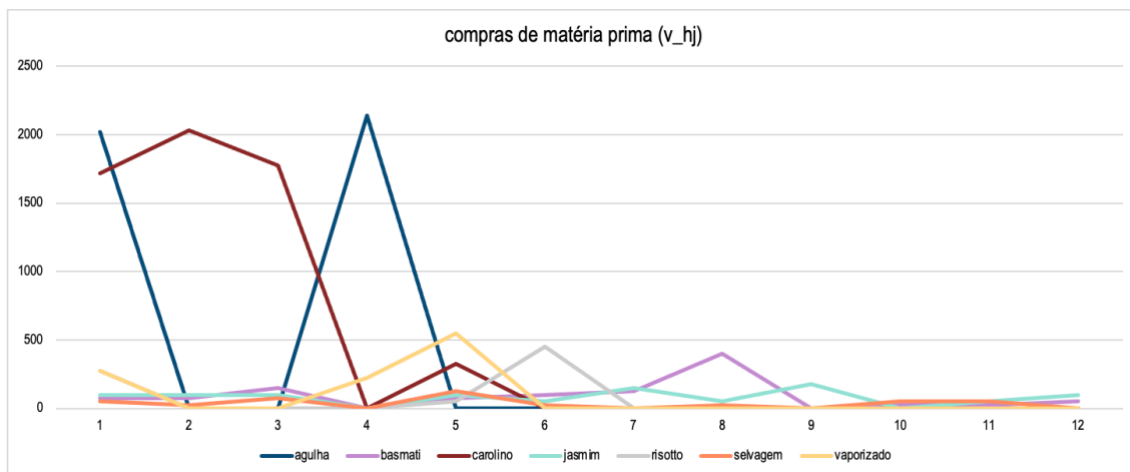


Figura 4.2 - Representação gráfica das compras de matéria-prima do cenário base da Formulação 1.

Relembrando as equações (1.7), cinco dos sete produtos são comprados sob a forma de parcelas de lotes múltiplos. A Figura 4.3 procura evidenciar a entrada de lotes em armazém.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

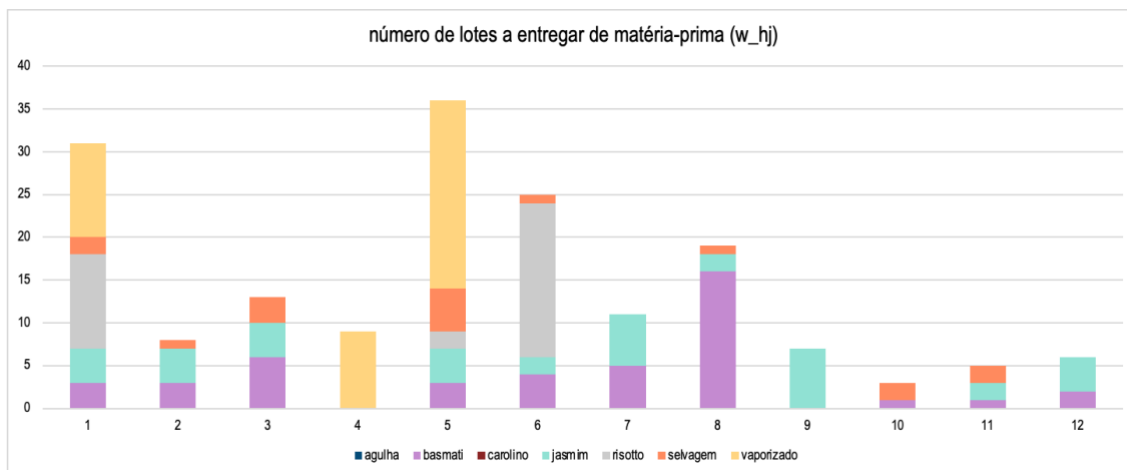


Figura 4.3 - Representação gráfica do número de lotes de Basmati, Jasmim, Risotto, Selvagem e Vaporizado a adquirir no cenário base da Formulação 1.

Um dos princípios que se pretendia garantir na formulação é a não existência de rotura de *stock*. A Figura 4.4 mostra a evolução de matéria-prima presente em armazém no fim de cada mês.

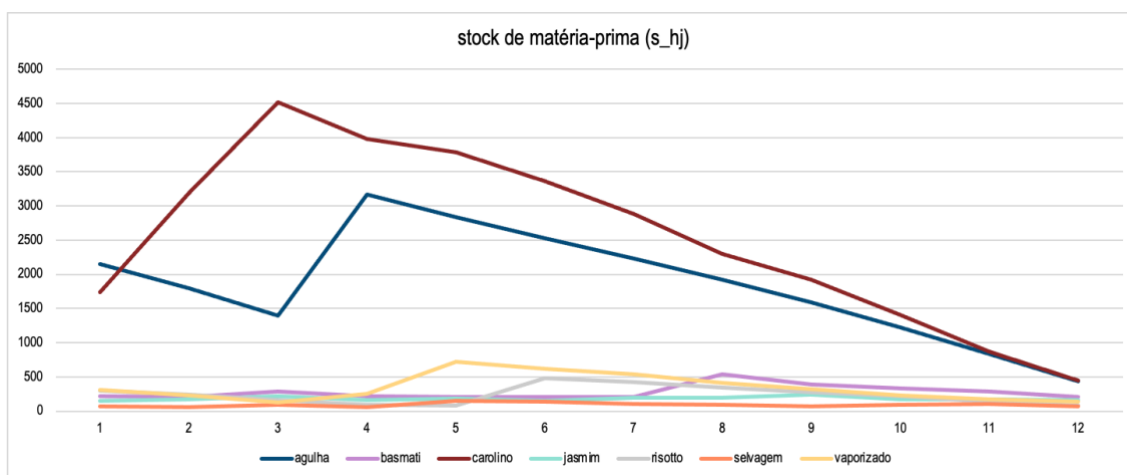


Figura 4.4 - Representação gráfica do *stock* de matéria-prima em final de mês no cenário base da Formulação 1.

As restrições (1.3) definem o limite mínimo mensal para o *stock* para os onze primeiros meses e as restrições (1.4) garantem o limite mínimo para o último mês. Assim sendo,

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

torna-se importante visualizar que tal ocorre e a Figura 4.5 permite demonstrar que o *stock* nunca é inferior ao limite mínimo mensal.



Figura 4.5 - Conjunto de representações gráficas das existências do *stock* dos sete produtos no cenário base da Formulação 1.

Com as inequações (1.8) procurava-se que a solução respeitasse os limites orçamentais mensais definidos. Na Figura 4.6, observa-se o limite mensal estabelecido e o gasto efetivo perante a solução obtida. Constatou-se que, em parte do tempo de estudo, os limites mensais não são atingidos. Desse modo, a Tabela 4.7 permite conferir numericamente esta informação e ainda apresentar o excedente.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

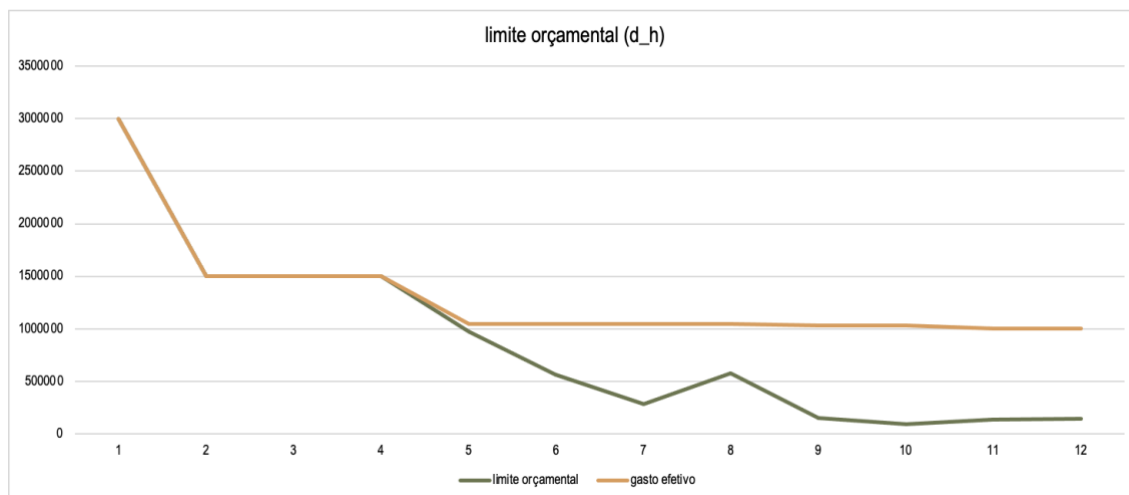


Figura 4.6 - Representação gráfica do limite orçamental para o cenário base da Formulação 1.

Tabela 4.7 - Tabela informativa de disponibilidade financeira, gasto efetivo e excedente orçamental, em euros (€), para o cenário base da Formulação 1.

		<i>Disponibilidade Financeira</i>	<i>Gasto Efetivo</i>	<i>Excedente Orçamental</i>
<i>Meses</i>	<i>1</i>	3 000 000	3 000 000	-
	<i>2</i>	1 500 000	1 500 000	-
	<i>3</i>	1 500 000	1 500 000	-
	<i>4</i>	1 500 000	1 500 000	-
	<i>5</i>	1 050 000	973 806	76 194
	<i>6</i>	1 050 000	558 750	491 250
	<i>7</i>	1 050 000	283 750	766 250
	<i>8</i>	1 050 000	573 750	476 250
	<i>9</i>	1 030 000	148 750	881 250
	<i>10</i>	1 030 000	93 750	936 250
	<i>11</i>	1 000 000	136 250	863 750
	<i>12</i>	1 000 000	147 500	852 500
<i>Total</i>		15 760 000	10 416 306	5 343 694

Perante os elementos analisados, nos primeiros meses regista-se que o limite orçamental é atingido, mas a partir do quinto mês a situação é alterada com uma diferença total de

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

5343694 euros face ao valor disponível, correspondendo a um excedente de 33.9% face ao orçamento.

4.1.2 Cenário A2: Variação da Procura

Simular diferentes níveis auxilia na identificação de pontos críticos e permite otimizar recursos. Perante o problema apresentado, de forma a não haver roturas de *stock*, a variação da procura apresenta-se como o ponto-chave para a formulação. Assim, procurou-se variar este parâmetro, com uma variação mensal de 20%.

4.1.2.1 Cenário A2.1: Aumento da Procura

Uma das situações que podem ocorrer numa empresa é o aumento de procura. Deste modo, aplicou-se um aumento contínuo de 20% para todos os produtos em estudo e para a totalidade do tempo. O presente cenário visa examinar as consequências do aumento da mesma. A Figura 4.7 representa graficamente a procura para o tempo em estudo.

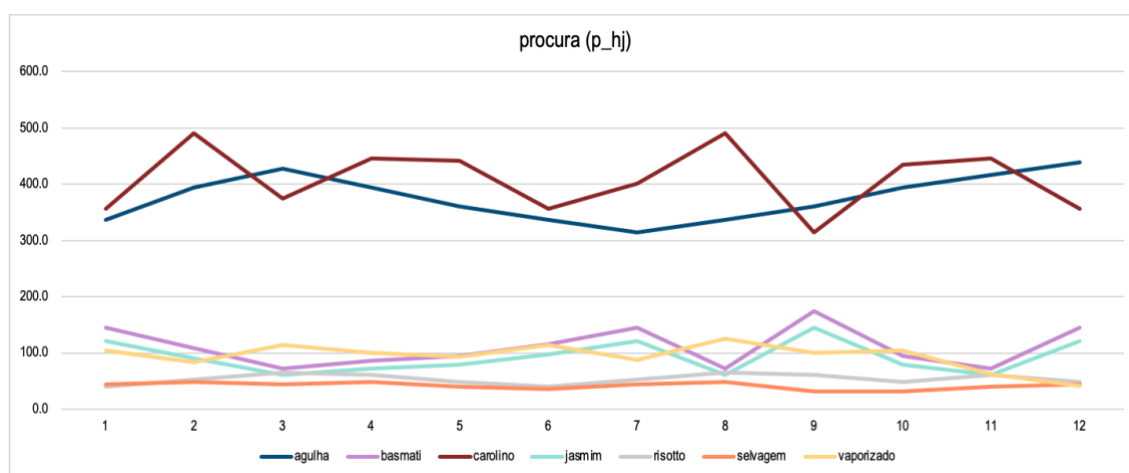


Figura 4.7 - Representação gráfica da procura perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 1.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Considerando esta procura e tendo como finalidade a redução máxima de despesas, a resposta da função objetivo é 12572460 euros, implicando a compra de 17181.6 ton. A Tabela 4.8 resume uma parte da solução, nomeadamente referente às compras a realizar, adicionando a informação do número de lotes para os produtos Basmati, Jasmim, Risotto, Selvagem e Vaporizado. A Figura 4.8 apresenta esta informação sob a forma de gráfico.

Tabela 4.8 – Tabela resumo das compras de matéria-prima e o número de lotes associados na matéria-prima Basmati, Jasmim, Risotto, Selvagem e Vaporizado, perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 1.

Compras v_{ij}		A		B		C		J		R		S		V	
Meses	1	2610.1	-	300.0	12	510.1	-	150.0	6	250.0	10	75.0	3	350.0	14
	2	0.0	-	0.0	0	1752.8	-	175.0	7	100.0	4	125.0	5	0.0	0
	3	2381.0	-	0.0	0	0.0	-	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0
	4	0.0	-	225.0	9	872.5	-	75.0	3	0.0	0	25.0	1	825.0	33
	5	0.0	-	100.0	4	1027.7	-	75.0	3	200.0	8	25.0	1	0.0	0
	6	0.0	-	0.0	0	1037.8	-	100.0	4	250.0	10	25.0	1	75.0	3
	7	0.0	-	200.0	8	704.5	-	100.0	4	0.0	0	200.0	8	0.0	0
	8	0.0	-	275.0	11	919.2	-	75.0	3	0.0	0	25.0	1	0.0	0
	9	0.0	-	0.0	0	191.0	-	150.0	6	0.0	0	0.0	0	0.0	0
	10	0.0	-	25.0	1	0.0	-	250.0	10	0.0	0	0.0	0	0.0	0
	11	0.0	-	125.0	5	0.0	-	0.0	0	75.0	3	0.0	0	0.0	0
	12	0.0	-	75.0	3	0.0	-	25.0	1	50.0	2	0.0	0	0.0	0

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

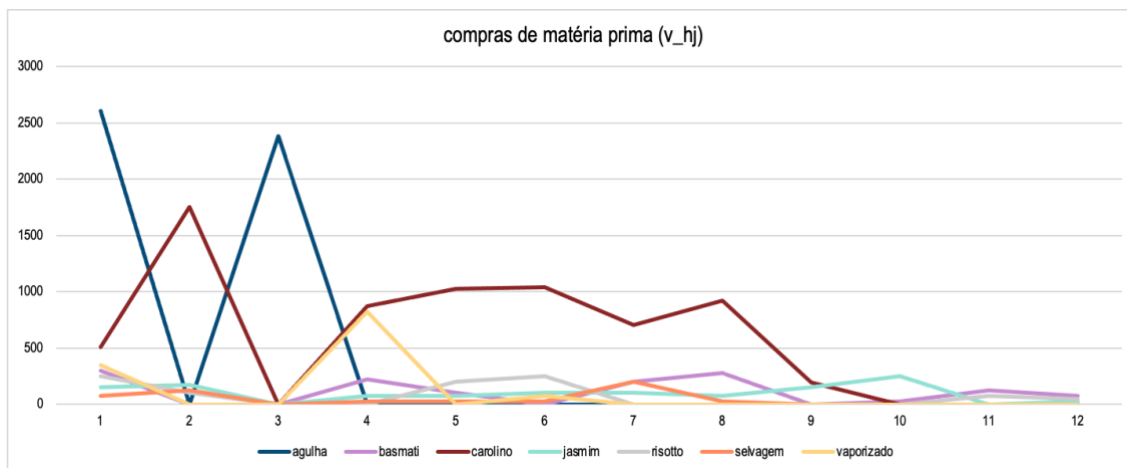


Figura 4.8 - Representação gráfica das compras de matéria-prima perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 1.

A Figura 4.9 pretende mostra a entrada de lotes em armazém, complementando assim a informação fornecida na Tabela 4.8.

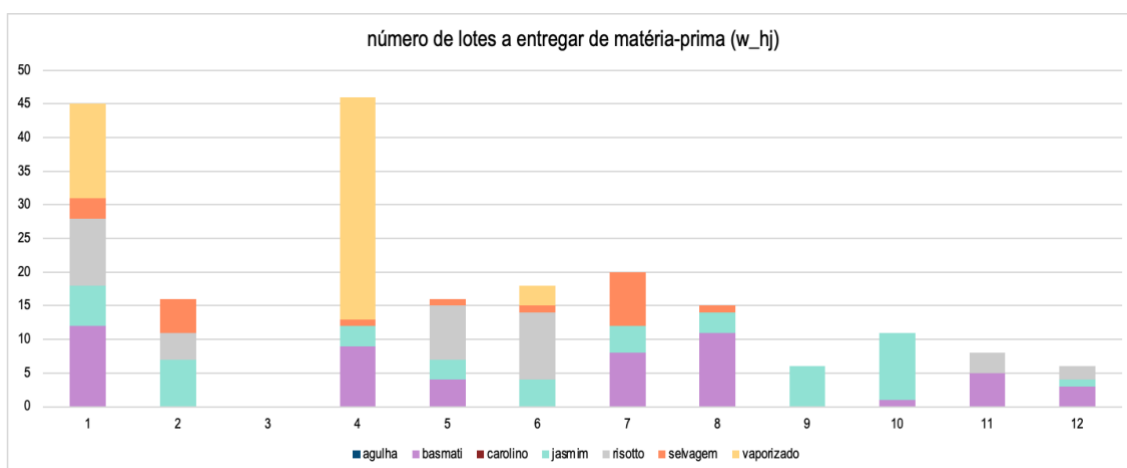


Figura 4.9 - Representação gráfica do número de lotes de basmati, jasmim, risotto, selvagem e vaporizado a adquirir prima perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 1.

A Figura 4.10 apresenta a evolução de *stock* de matéria-prima no fim de cada mês.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

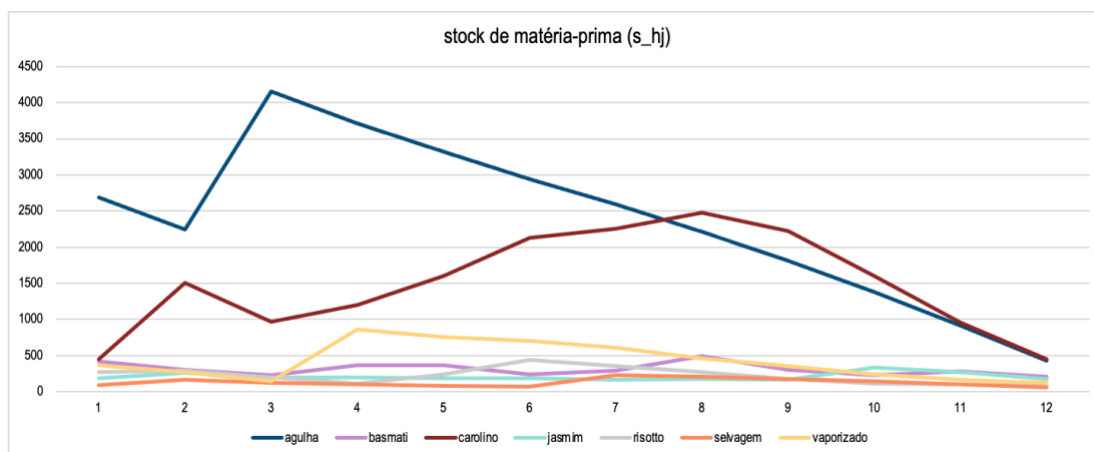


Figura 4.10 - Representação gráfica do stock de matéria-prima em final de mês perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 1.

Para facilitar a análise, a Figura 4.10 pode ser decomposta pelos vários tipos de arroz, cruzando essa informação com o limite mínimo mensal estabelecido, dando lugar à Figura 4.11.

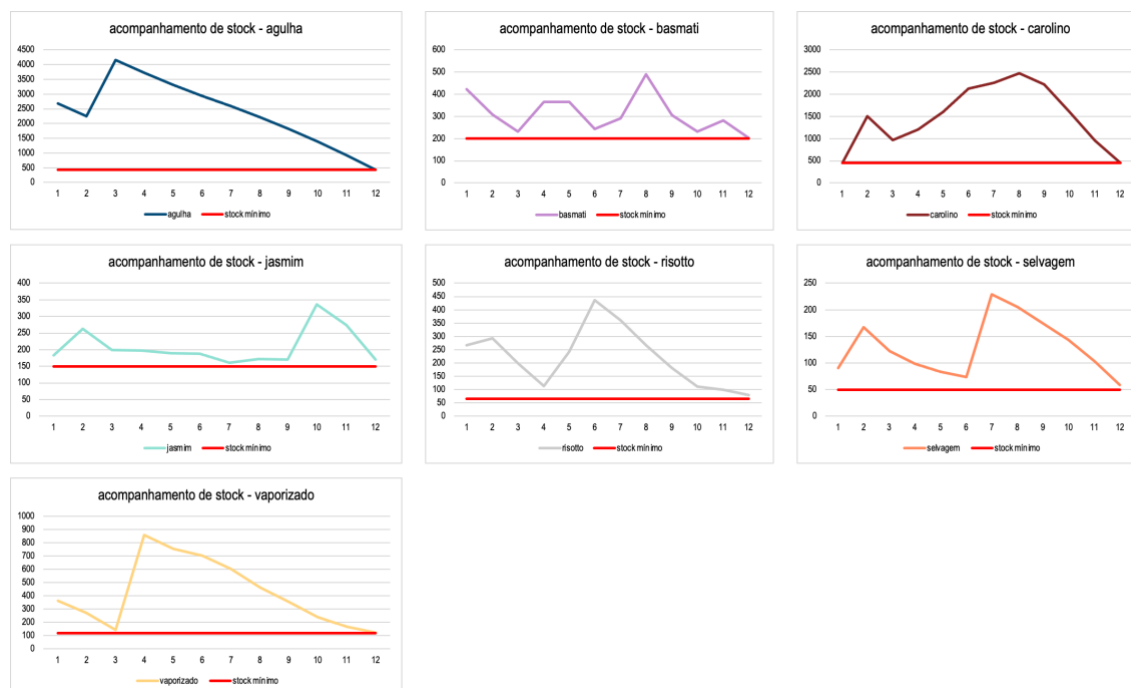


Figura 4.11 - Conjunto representações gráficas do acompanhamento de stock dos sete produtos perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 1.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Na Figura 4.12, observa-se o limite orçamental mensal estabelecido e o gasto efetivo perante a solução obtida. É perceptível que os limites mensais são atingidos em dois terços do estudo. A Tabela 4.9 permite conferir numericamente esta informação, mostrando ainda o excedente.

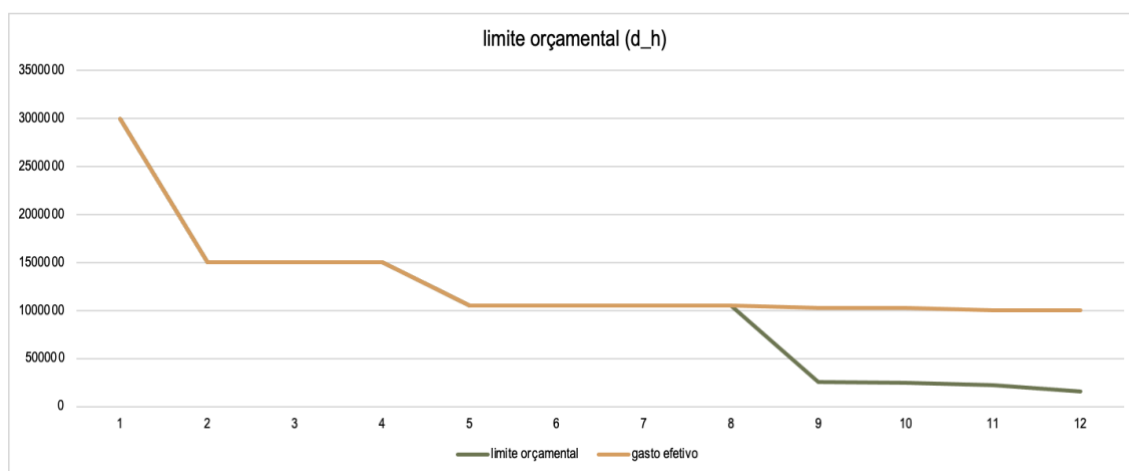


Figura 4.12 - Representação gráfica do limite orçamental perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 1.

Tabela 4.9 - Tabela informativa de disponibilidade financeira, gasto efetivo e excedente orçamental em euros (€) perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 1.

		<i>Disponibilidade Financeira</i>	<i>Gasto Efetivo</i>	<i>Excedente Orçamental</i>
<i>Meses</i>	1	3 000 000	3 000 000	-
	2	1 500 000	1 500 000	-
	3	1 500 000	1 500 000	-
	4	1 500 000	1 500 000	-
	5	1 050 000	1 050 000	-
	6	1 050 000	1 050 000	-
	7	1 050 000	1 050 000	-
	8	1 050 000	1 050 000	-
	9	1 030 000	255 460	774 540
	10	1 030 000	243 750	786 250
	11	1 000 000	217 750	782 250
	12	1 000 000	155 500	844 500
<i>Total</i>		15 760 000	12 572 460	3 187 540

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

O limite orçamental é atingido nos primeiros oito meses. Regista-se uma diferença de 3187540 euros face ao valor total disponível e correspondendo a um excedente de 20.2% face ao orçamento.

4.1.2.2 Cenário A2.2: Diminuição da Procura

A redução de encomendas é uma circunstância no meio empresarial. Assim, aplicou-se uma diminuição contínua de 20% para todos os produtos em estudo e ao longo de todo o horizonte de planeamento. O presente cenário visa examinar as consequências da quebra de procura, cuja informação encontra-se presente na Figura 4.13.

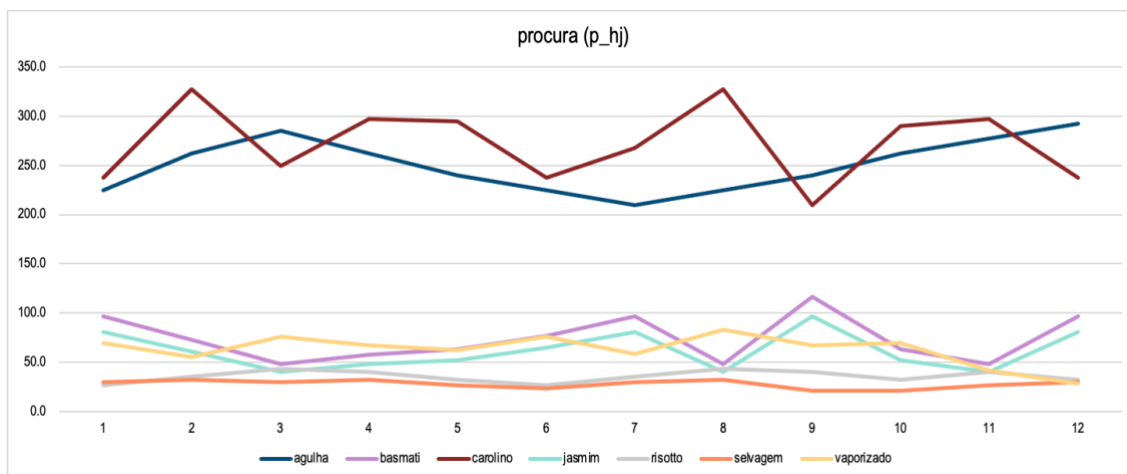


Figura 4.13 - Representação gráfica da procura perante um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 1.

Com base nestes valores e tendo em vista a redução máxima de despesas, o valor da função objetivo é 8305573 euros, o que implicaria a compra de 11447.7 ton. A Tabela 4.10 resume os volumes de compras a realizar, assim como a informação do número de lotes para os produtos Basmati, Jasmim, Risotto, Selvagem e Vaporizado. A Figura 4.14 apresenta esta informação sob a forma de gráfico.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Tabela 4.10 - Tabela resumo das compras de matéria-prima e o número de lotes associados na matéria-prima Basmati, Jasmim, Risotto, Selvagem e Vaporizado, perante um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 1.

	<i>Compras</i>		<i>A</i>		<i>B</i>		<i>C</i>		<i>J</i>		<i>R</i>		<i>S</i>		<i>V</i>	
	<i>v_{tj}</i>															
<i>Meses</i>	1	3320.7	-	50.0	2	694.4	-	75.0	3	200.0	8	25.0	1	225.0	9	
	2	0.0	-	75.0	3	2015.7	-	75.0	3	0.0	0	50.0	2	0.0	0	
	3	0.0	-	50.0	2	1966.9	-	125.0	5	0.0	0	50.0	2	0.0	0	
	4	0.0	-	50.0	2	0.0	-	25.0	1	0.0	0	0.0	0	625.0	25	
	5	0.0	-	500.0	20	0.0	-	0.0	0	50.0	2	125.0	5	0.0	0	
	6	0.0	-	0.0	0	0.0	-	125.0	5	375.0	15	0.0	0	0.0	0	
	7	0.0	-	0.0	0	0.0	-	75.0	3	0.0	0	0.0	0	0.0	0	
	8	0.0	-	25.0	1	0.0	-	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	
	9	0.0	-	25.0	1	0.0	-	150.0	6	0.0	0	0.0	0	0.0	0	
	10	0.0	-	0.0	0	0.0	-	100.0	4	0.0	0	25.0	1	0.0	0	
	11	0.0	-	0.0	0	0.0	-	25.0	1	0.0	0	50.0	2	0.0	0	
	12	0.0	-	100.0	4	0.0	-	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	

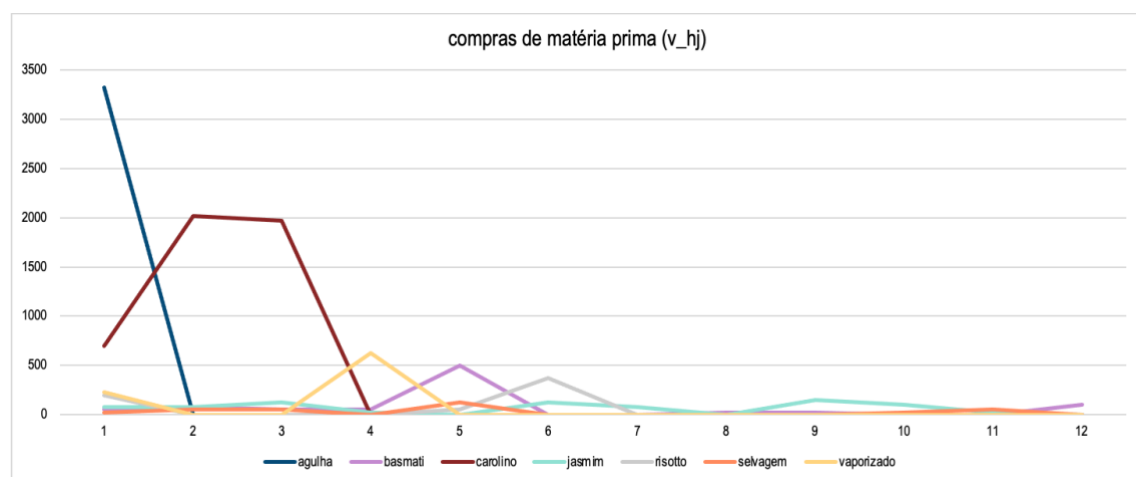


Figura 4.14 - Representação gráfica das compras de matéria-prima perante um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 1.

Com a Figura 4.15 apresenta-se a entrada de lotes em armazém, complementando assim a informação fornecida na Tabela 4.10.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

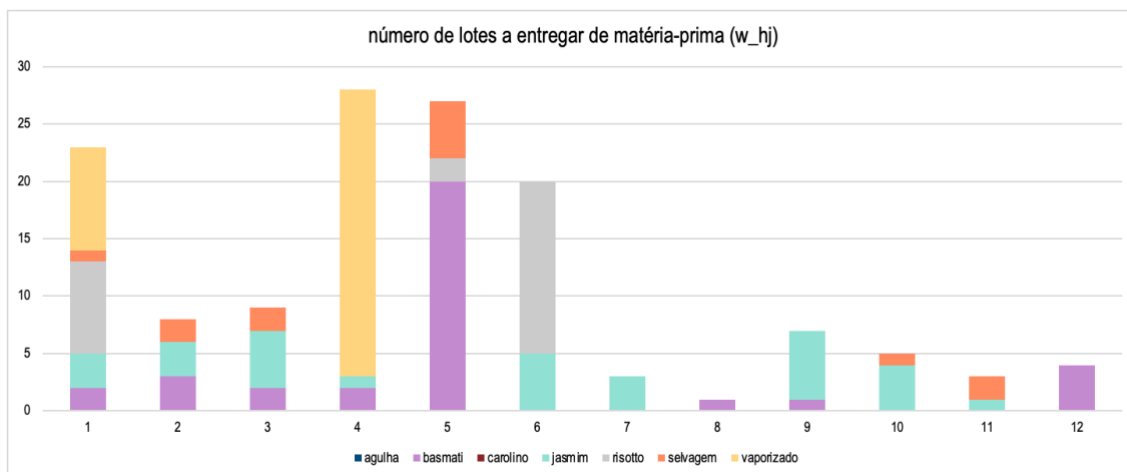


Figura 4.15 - Representação gráfica do número de lotes de Basmati, Jasmim, Risotto, Selvagem e Vaporizado a adquirir prima perante um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 1.

A Figura 4.16 mostra a evolução de *stock* de matéria-prima no final de cada mês.

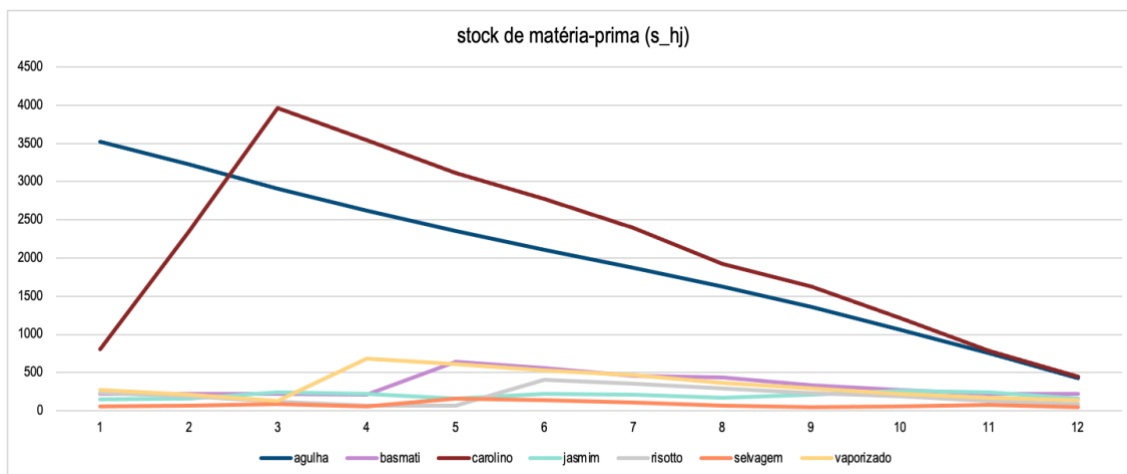


Figura 4.16 - Representação gráfica do *stock* de matéria-prima em final de mês perante um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 1.

Ao ser decomposta a Figura 4.16 pelos vários tipos de arroz, é possível acompanhar os diferentes valores de *stock* no decorrer dos meses, tal como mostra a Figura 4.17.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

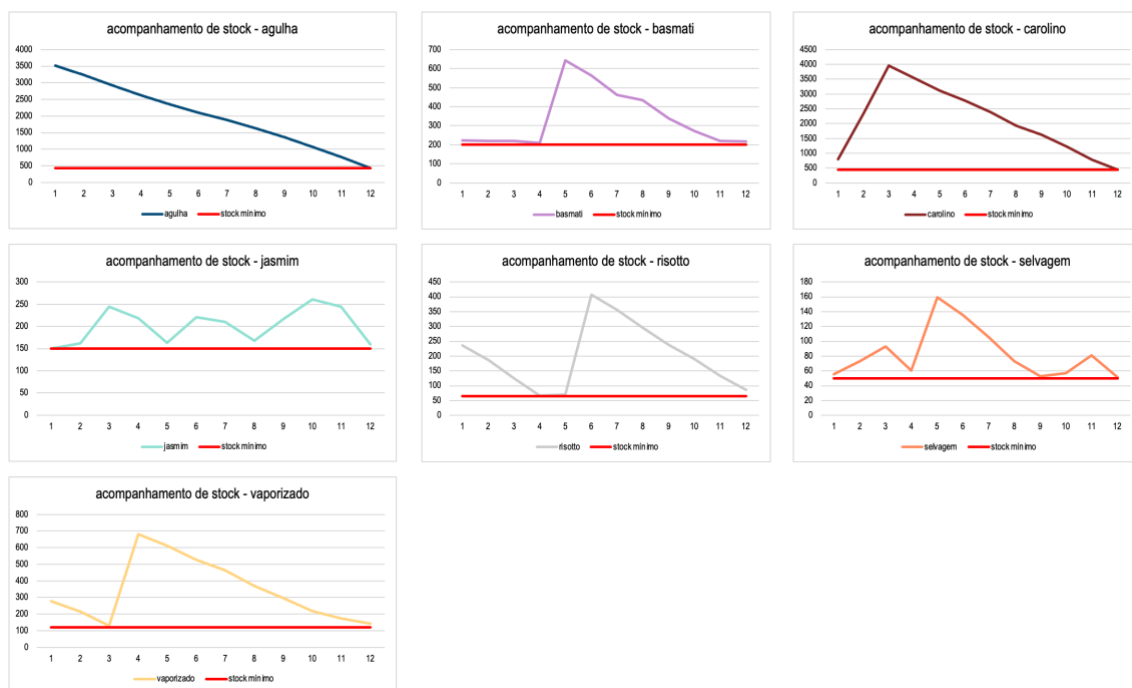


Figura 4.17 - Conjunto de representações gráficas do acompanhamento de stock dos sete produtos perante um cenário de diminuição de 20%, face ao cenário base da Formulação 1.

Na Figura 4.18, é possível observar o limite orçamental mensal estabelecido e o gasto efetivo perante a solução obtida. Torna-se perceptível que os limites mensais são atingidos em um quarto do estudo. A Tabela 4.11 permite confirmar numericamente esta informação, apresentando ainda o excedente.

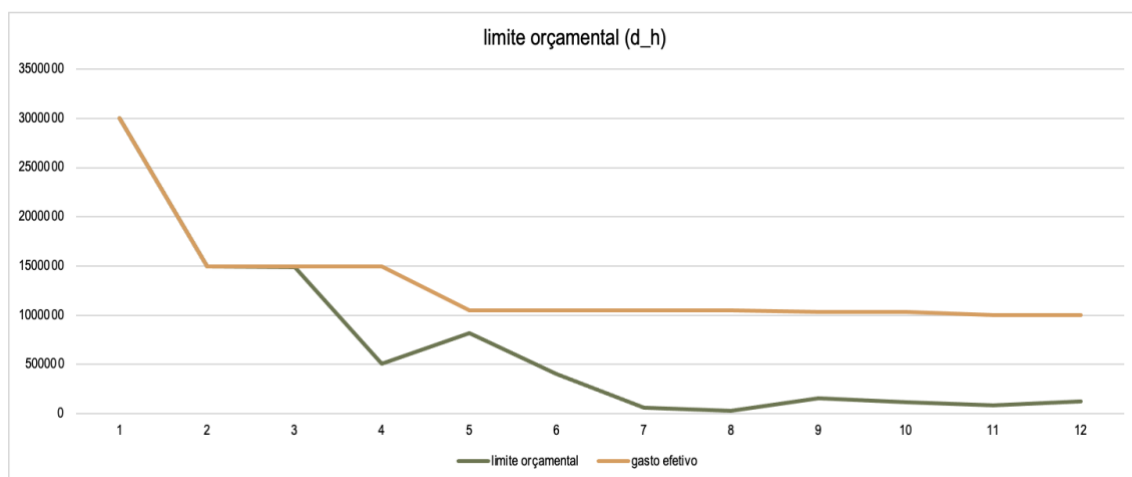


Figura 4.18 - Representação gráfica do limite orçamental perante um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 1.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Tabela 4.11 - Tabela informativa de disponibilidade financeira, gasto efetivo e excedente orçamental em euros (€) perante um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 1.

		<i>Disponibilidade Financeira</i>	<i>Gasto Efetivo</i>	<i>Diferença</i>
<i>Meses</i>	<i>1</i>	3 000 000	3 000 000	-
	<i>2</i>	1 500 000	1 500 000	-
	<i>3</i>	1 500 000	1 490 074	9 926
	<i>4</i>	1 500 000	508 750	991 250
	<i>5</i>	1 050 000	821 750	228 250
	<i>6</i>	1 050 000	406 250	643 750
	<i>7</i>	1 050 000	63 750	986 250
	<i>8</i>	1 050 000	31 250	1 018 750
	<i>9</i>	1 030 000	158 750	871 250
	<i>10</i>	1 030 000	116 250	913 750
	<i>11</i>	1 000 000	83 750	916 250
	<i>12</i>	1 000 000	125 000	875 000
	<i>Total</i>	15 760 000	8 305 574	7 454 426

Para este cenário, o limite orçamental mensal é atingido nos dois primeiros meses e a diferença é de 7454426 euros face ao valor total disponível, correspondendo a um excedente de 47.2% face ao orçamento.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Comparação A1-A2

A Tabela 4.12 mostra os resultados obtidos através do OpenSolver para os cenários apresentados anteriormente – cenário base (A1), cenário de aumento da procura (A2.1) e cenário diminuição da procura (A2.2).

Tabela 4.12 - Tabela resumo dos resultados e tempos de execução devolvidos pelo OpenSolver para cada cenário em estudo da Formulação 1.

	Cenário A1	Cenário A2.1	Cenário A2.2
<i>Resultado</i>	Por tempo limite	Por tempo limite	Por tempo limite
<i>Solução ótima</i>	10 416 305.572	12 572 460.330	8 305 573.863
<i>Valor da melhor solução admissível</i>	10 345 059.615	12 505 104.207	8 241 832.861
<i>Gap (%)</i>	0.01	0.01	0.01
<i>Número de nodos</i>	1 242 620	851 976	663 007
<i>Total de iterações</i>	1 976 060	1 154 674	1 117 772
<i>Tempo (CPU)</i>	100.02	100.05	100.14
<i>Tempo (Wallclock)</i>	110.74	149.30	138.38

Face aos cenários apresentados, é essencial comparar os diferentes resultados. Assim, a Tabela 4.13 resume as informações referentes à totalidade da quantidade comprada anualmente (V_{total}), ao valor da função objetivo $z1$, e o valor de diferença entre a disponibilidade financeira total (D_{total}) e o gasto efetivo ($z1$) indicado na tabela como excedente orçamental ($D_{total} - z1$). A obtenção destes valores segue as equações abaixo apresentadas:

$$V_{total} = \sum_{h=1}^{12} \sum_{j=1}^7 v_{hj}, j=1, ..., 7 \quad (3.1)$$

$$D_{total} = \sum_{h=1}^{12} d_h \quad (3.2)$$

A tabela apresenta ainda valores relativos à taxa de variação percentual entre o cenário base e o cenário a ser analisado para o volume total de compras (V_{total}) e o gasto efetivo

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

(z1). Este valor é obtido pelo quociente entre a diferença entre o valor do cenário A2.1 ou A2.2 e o cenário A1 e o valor do cenário A1. As expressões (3.3) e (3.4) permitem ilustrar o cálculo de variação para o volume total de compras e para o gasto nas compras (z1), para:

$$Gap_1 = \begin{cases} \frac{V_{total\ A2.1} - V_{total\ A1}}{V_{total\ A1}} \times 100, \text{entre A2.1 e A1} \\ \frac{V_{total\ A2.2} - V_{total\ A1}}{V_{total\ A1}} \times 100, \text{entre A2.2 e A1} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$Gap_2 = \begin{cases} \frac{z1_{A2.1} - z1_{A1}}{z1_{A1}} \times 100, \text{entre A2.1 e A1} \\ \frac{z1_{A2.2} - z1_{A1}}{z1_{A1}} \times 100, \text{entre A2.2 e A1} \end{cases} \quad (3.4)$$

Por sua vez, a variação perante o excedente orçamental é relativa ao total do orçamento. A expressão (3.5) permite demonstrar esse cálculo:

$$Gap_3 = \begin{cases} \frac{D_{total\ A1} - z1_{total\ A1}}{D_{total\ A1}} \times 100, \text{para A1} \\ \frac{D_{total\ A2.1} - z1_{total\ A2.1}}{D_{total\ A2.1}} \times 100, \text{para A2.1} \\ \frac{D_{total\ A2.2} - z1_{total\ A2.2}}{D_{total\ A2.2}} \times 100, \text{para A2.2} \end{cases} \quad (3.5)$$

Tabela 4.13 - Tabela resumo da resposta dos cenários em estudo da Formulação 1.

	Volume total de compras V_{total}		Gasto efetivo $z1$		Excedente orçamental $D_{total} - z1$	
		Gap_1		Gap_2		Gap_3
Cenário A1	14 327.2		10 416 306		5 343 694.4	33.9%
Cenário A2.1	17 181.6	19.9%	12 572 460	20.7%	3 187 539.6	20.2%
Cenário A2.2	11 447.7	-20.1%	8 305 574	-20.3%	7 454 426.2	47.2%

Da leitura na Tabela 4.13, constata-se que a variação da procura de matéria-prima tem reflexo no volume total das compras e de igual modo se verifica no gasto efetivo, sendo possível verificar essa informação pelos cálculos realizados por (3.3) e (3.4).

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Relativamente ao excedente orçamental, tal como seria expectável, o aumento da procura leva a um menor valor de excedente no final do período em análise.

Para a componente relativa às compras, considerou-se necessária uma representação visual das diferentes quantidades envolvidas nos vários cenários e a Figura 4.19 mostra as quantidades de matéria-prima a adquirir para cada produto. Nessa figura, o cenário base encontra-se representado nas barras a cheio e as duas variações com os padrões de riscas diagonais e pontilhado face a aumento ou redução de 20% da procura, respetivamente.

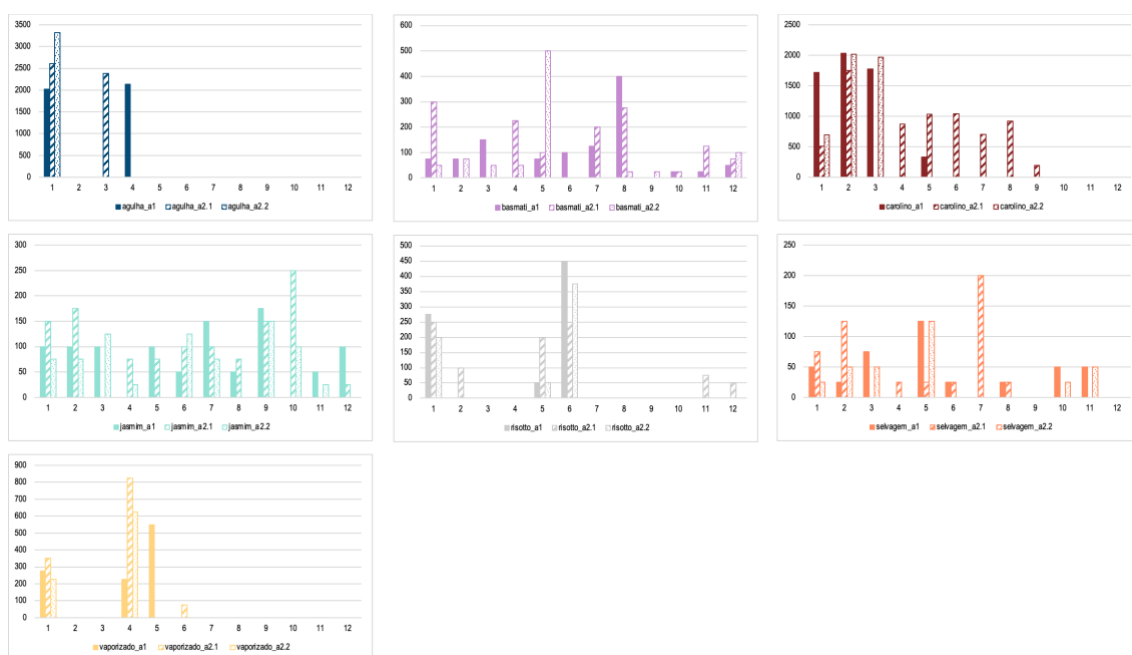


Figura 4.19 - Conjunto de representações gráficas das compras das matérias primas segundo os diferentes cenários da Formulação 1.

Através da Figura 4.19, é possível recolher dados dos padrões de compras das diferentes matérias primas. Uma hipótese é que tanto o aumento como a redução em 20% da procura poderiam causar um padrão espelhado nas compras, nessa mesma distribuição anual. Porém, tal situação não se verifica. Será então através da conjugação dos fatores de procura, compra em lotes, custo de aquisição e disponibilidade financeira que se modelam os diferentes padrões de compras que surgem para os cenários hipotéticos de variação.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Registe-se também que perante a variação de procura seria espectável que o somatório da compra anual refletisse essa mesma variação. A Tabela 4.14 apresenta as quantidades anuais a comprar das diferentes matérias-primas ($V_{produto}$), com as variações de toneladas que se encontram envolvidas por produto ($\Delta V_{produto}$) e o que representa esse valor em percentagem. A obtenção dos valores presentes na tabela referente ao cenário A2.1 segue a equação (3.6) e expressões (3.7) e (3.8) abaixo apresentadas:

$$V_{produto} = \sum_{h=1}^{12} v_{hj}, j=1, \dots, 7 \quad (3.6)$$

$$\Delta V_{produto} = \begin{cases} V_{produto\ A2.1} - V_{produto\ A1}, & \text{entre A2.1 e A1} \\ V_{produto\ A2.2} - V_{produto\ A1}, & \text{entre A2.2 e A1} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$Gap_4 = \begin{cases} \frac{V_{produto\ A2.1} - V_{produto\ A1}}{V_{produto\ A1}} \times 100, & \text{entre A2.1 e A1} \\ \frac{V_{produto\ A2.2} - V_{produto\ A1}}{V_{produto\ A1}} \times 100, & \text{entre A2.2 e A1} \end{cases} \quad (3.8)$$

Tabela 4.14 - Tabela resumo das quantidades anuais de compra por matérias-primas para os três cenários, com a comparação de variação de quantidades em valor e em percentagem da Formulação 1.

	Cenário A1	Cenário A2.1			Cenário A2.2		
	$V_{produto}$	$V_{produto}$	$\Delta V_{produto}$	Gap_4	$V_{produto}$	$\Delta V_{produto}$	Gap_4
Agulha	4155.9	4991.1	835.2	20.10%	3320.7	-835.2	-20.10%
Basmati	1100.0	1325.0	225.0	20.45%	875.0	-225.0	-20.45%
Carolino	5846.3	7015.5	1169.3	20.00%	4677.0	-1169.3	-20.00%
Jasmim	975.0	1175.0	200.0	20.51%	775.0	-200.0	-20.51%
Risotto	775.0	925.0	150.0	19.35%	625.0	-150.0	-19.35%
Selvagem	425.0	500.0	<u>75.0</u>	<u>17.65%</u>	325.0	<u>-100.0</u>	<u>-23.53%</u>
Vaporizado	1050.0	1250.0	200.0	19.05%	850.0	-200.0	-19.05%

Embora o padrão anual de compras se tenha revelado diferente nos dois cenários de variação, a diferença de quantidade adquirida ao longo do ano é simétrica para todos os produtos e as variações de compra têm valores próximos de 20%, para o Cenário A2.1, e de -20%, para o Cenário A2.2. O enunciado anteriormente não se verifica com o Selvagem, como se observa nos valores sublinhados. A compra deste arroz acontece em

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

lotes e a conjugação da redução de 20% da procura com o *stock* inicial, o valor mínimo de *stock* final e o princípio de redução de custos de aquisição levou a que não fosse necessária a compra de outra parcela. Sabe-se, pois, que há outros produtos que também são adquiridos em lotes, mas tal não se verificou nos restantes.

Quanto à variável limite orçamental, verifica-se na Tabela 4.13 que os valores gastos totais seguem a tendência de espelhar a variação causada na procura. Deste modo, atente-se na visualização do modo como a distribuição monetária é analisável pelo período em estudo. A Figura 4.20 pretende demonstrar os diferentes padrões de gasto.

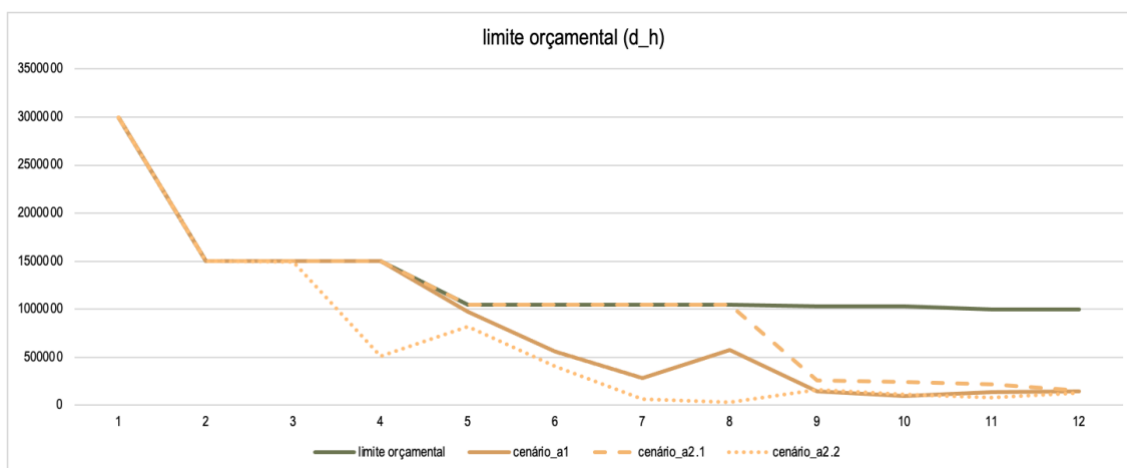


Figura 4.20 - Representação gráfica do limite orçamental e dos gastos mensais pelos cenários da Formulação 1.

Assim, no Cenário A2.1, a aproximação ao limite orçamental ocorre num maior número de meses, mas o afastamento é mais cedo no Cenário A2.2. Porém, os dois cenários de variação (A2.1 e A2.2) não seguem o padrão estabelecido no Cenário A1. Tendo em conta o parâmetro custo de aquisição (c_{hj}), será este que terá uma grande influência para garantir o pressuposto de planejar as compras de forma a não haver rotura de *stock*, minimizando os custos associados.

4.2 Formulação 2

Seguidamente serão apresentados resultados e conclusões através da Formulação 2, a partir da qual se obtêm soluções para responder ao planeamento da produção da empresa. A formulação tem uma única função objetivo escalonada, dando prioridade à minimização da procura não satisfeita. Em segundo plano, e entre soluções alternativas do objetivo principal, minimiza também o número de limpezas (y_{2ij}) e confere prioridade ao armazenamento de produto semi-acabado em silo em vez de *big-bags*.

A análise do sub-problema aqui em discussão – planeamento da produção, encontra-se organizada da seguinte forma: será iniciado com um cenário base (B1), constituindo uma referência para os cenários alternativos que serão considerados nos casos seguintes. Seguindo o critério utilizado na Formulação 1, serão apresentados dois cenários: um de aumento (B2.1) e outro de diminuição (B2.2) da procura, envolvendo variações uniformes de 20%. Posteriormente, com a mesma procura do cenário base, serão apresentados três cenários influenciados pela variação de horas de trabalho. Numa fase inicial será apresentado um maior número de horas semanais de laboração (B3.1), considerando uma situação de trabalho com o uso máximo de horas em que é possível uma fábrica com grau de ruído elevado trabalhar; menos horas semanais (B3.2), reproduzindo as condições de semana de quatro dias de trabalho, e a versão do máximo de horas possíveis de trabalho (B3.3), ou seja, as vinte e quatro horas nos trinta dias apresentados na formulação. Serão ainda testadas duas ocorrências de manutenção, em que durante uma semana será possível acontecer nas fases de descasque (B4.1) ou embalamento (B4.2).

Para todos os cenários apresentados, há parâmetros constantes no decorrer da apresentação, análise e discussão dos cenários. Face à capacidade envolvida, cada silo comporta 28 toneladas e a capacidade máxima de armazenamento em *big-bags* é de 40 toneladas. Refira-se ainda que há parâmetros que são definidos devido ao estado de entrada do arroz no processo. Esta informação encontra-se agregada na Tabela 4.15.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Tabela 4.15 - Tabela-resumo dos parâmetros de tempo e dependentes deste, em minutos, de processamento de descasque de matéria-prima ($c11_j$ e $c21_j$) e de embalagem ($c12_j$ e $c22_j$).

Parâmetros		Arroz em Casca	Arroz em Película	Arroz Branqueado
Processamento descasque	$c11_j$ e $c21_j$	8	6.5	2
Processamento embalagem	$c12_j$ e $c22_j$	8	8	8
Limpeza de descasque	h_j	60	60	60
Quantidade máxima de descasque	$M1_j$	60	73.8	240
Quantidade máxima de embalagem	$M2_j$	60	60	60

Como referenciado anteriormente, o arroz Selvagem não é um tipo de arroz. Porém, o seu processamento é moroso, alocando recursos, que, em termos temporais, tem um comportamento semelhante a arroz em casca, estabelecendo-se assim o uso dos valores definidos na Tabela 4.15.

Torna-se também importante sublinhar mais alguns aspetos concernentes com parâmetros descritos. Em relação ao descasque, é de notar que há tempos de processamento ($c11_j$ e $c21_j$) distintos e que estes são dependentes do estado de matéria-prima. São estes tempos que também influenciam a quantidade máxima de produto que é processado no descasque ($M1_j$). Por outro lado, a ação de limpeza (h_j) que ocorre no descasque tem um tempo fixo e é obrigatória acontecer na mudança de tipo de produtos.

Na fase de embalagem, verifica-se que os tempos ($c12_j$ e $c22_j$) são independentes do tipo de arroz, dando origem a que a quantidade máxima de embalagem seja também independente do tipo de arroz ($M2_j$).

Torna-se também importante definir os *stocks* para cada um dos tipos de arroz. Como é observável na Tabela 4.16, os *stocks* iniciais e finais de produto embalado, silos e *big-bags* mantêm-se iguais.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Tabela 4.16 - Tabela de descrição de parâmetros para cada tipo de arroz usados na Formulação 2.

<i>Parâmetros</i>		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>J</i>	<i>R</i>	<i>S</i>	<i>V</i>
<i>Stock inicial embalado</i>	$s1_{0j}$	21.60	2.10	21.60	7.20	2.10	3.50	3.00
<i>Stock inicial em silos</i>	$s2_{0j}$	5.0	2.0	15.0	3.0	2.0	2.0	1.0
<i>Stock inicial em big-bags</i>	$s3_{0j}$	10.0	5.0	1.0	10.0	2.0	2.0	10.0
<i>Stock final embalado</i>	$ls1_{nj}$	21.60	2.10	21.60	7.20	2.10	3.50	3.00
<i>Stock final em silos</i>	$ls2_{nj}$	5.0	2.0	15.0	3.0	2.0	2.0	1.0
<i>Stock final em big-bags</i>	$ls3_{nj}$	10.0	5.0	1.0	10.0	2.0	2.0	10.0

Para além dos parâmetros descritos, existe ainda a possibilidade de controlar a operacionalidade do descasque e do embalamento, definida pelos parâmetros $g1_{ij}$ e $g2_{ij}$ e controlada pelas inequações (2.24) e (2.25), respetivamente. A estrutura estabelecida nestes parâmetros permite definir períodos de fim de semana. A Tabela 4.17 possibilita verificar a estrutura de como ocorre a seleção, em que se encontra marcado o padrão descrito.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Tabela 4.17 - Tabela modelo de operacionalidade do descasque ($g1_{ij}$) e de embalagem ($g2_{ij}$).

Operacionalidade $g1_{ij}$ e $g2_{ij}$		A	B	C	J	R	S	V
Dias t	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1	1
	6	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0
	8	1	1	1	1	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1	1
	11	1	1	1	1	1	1	1
	12	1	1	1	1	1	1	1
	13	0	0	0	0	0	0	0
	14	0	0	0	0	0	0	0
	15	1	1	1	1	1	1	1
	16	1	1	1	1	1	1	1
	17	1	1	1	1	1	1	1
	18	1	1	1	1	1	1	1
	19	1	1	1	1	1	1	1
	20	0	0	0	0	0	0	0
	21	0	0	0	0	0	0	0
	22	1	1	1	1	1	1	1
	23	1	1	1	1	1	1	1
	24	1	1	1	1	1	1	1
	25	1	1	1	1	1	1	1
	26	1	1	1	1	1	1	1
	27	0	0	0	0	0	0	0
	28	0	0	0	0	0	0	0
	29	1	1	1	1	1	1	1
	30	1	1	1	1	1	1	1

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Por fim, de forma a resumir as características dos vários cenários, apresenta-se a Tabela 4.18 que permite apresentar esta informação de forma sistemática.

Tabela 4.18 - Tabela resumo de informação dos parâmetros que serão variados nos cenários a apresentar, em que a célula a sombreado é o parâmetro que será variável entre cenários.

		Procura d_{tj}	Tempo de laboração tt	Operacionalidade descasque $g1_{tj}$	Operacionalidade embalamento $g2_{tj}$
Cenário B1		$\sum d_{tj} = 924$	480	$g1_{tj} = 0$, para t com padrão de fim de semana	$g2_{tj} = 0$, para t com padrão de fim de semana
Cenário B2	B2.1	+20 %	480	$g1_{tj} = 0$, para t com padrão de fim de semana	$g2_{tj} = 0$, para t com padrão de fim de semana
	B2.2	- 20 %			
Cenário B3	B3.1	$\sum d_{tj} = 924$	900	$g1_{tj} = 0$, para t com padrão de fim de semana	$g2_{tj} = 0$, para t com padrão de fim de semana
	B3.2		480	$g1_{tj} = 0$, para t com padrão de sexta e fim de semana	$g2_{tj} = 0$, para t com padrão de sexta e fim de semana
	B3.3a	$\sum d_{tj} = 3696$	1 440	$g1_{tj} = 1$	$g2_{tj} = 1$
	B3.3b		1 440	$g1_{tj} = 1$	$g2_{tj} = 1$
Cenário B4	B4.1	$\sum d_{tj} = 924$	480	$g1_{tj} = 0$, para t com padrão de fim de semana e quando $t = 15$ a 19	$g2_{tj} = 0$, para t com padrão de fim de semana
	B4.2			$g1_{tj} = 0$, para t com padrão de fim de semana	$g2_{tj} = 0$, para t com padrão de fim de semana e quando $t = 15$ a 19

Como se observa, no cenário B3.3, pelas suas características, é necessário proceder à alteração nos parâmetros de operacionalidade, com o consequente funcionamento fabril em fim de semana, e o resultante aumento da procura.

4.2.1 Cenário B1: Dados base

Como já descrito, a Formulação 2 foi estabelecida tendo em conta um horizonte de planeamento mensal, logo com dados de procura mensal. Assim, foram definidos valores de procura que simulam cenários realistas para os diferentes tipos de arroz (d_{ij}), porém, e como referido inicialmente, diferentes dos valores reais, por motivos de confidencialidade. Esses valores são mostrados na Figura 4.21 e podem ser consultados na Tabela 4.19.

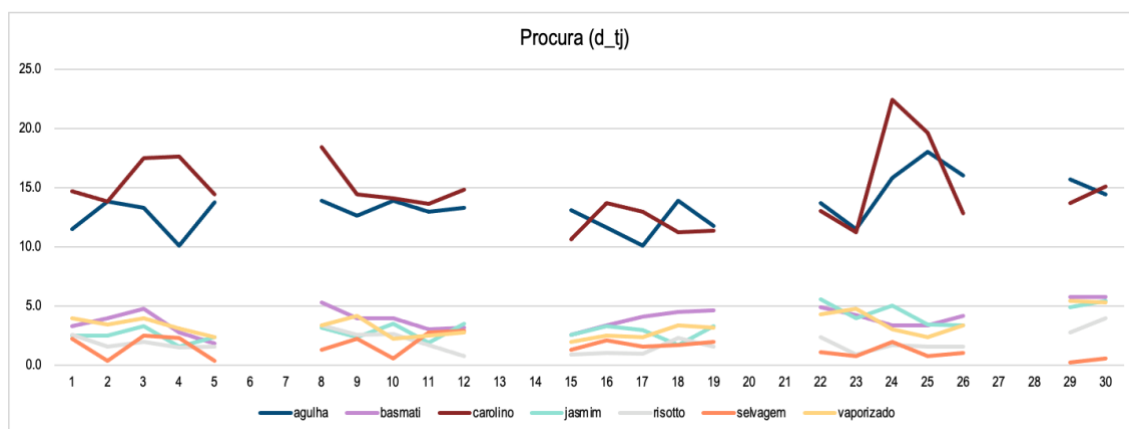


Figura 4.21 - Representação gráfica da procura para o cenário base da Formulação 2.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Tabela 4.19 - Tabela de dados de procura para o cenário base da Formulação 2.

<i>Dias</i> <i>t</i>	<i>Procura</i> <i>d_{tj}</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>J</i>	<i>R</i>	<i>S</i>	<i>V</i>
	1	11.5	3.3	14.7	2.5	2.6	2.2	4.0
	2	13.8	4.0	13.8	2.5	1.6	0.4	3.4
	3	13.3	4.8	17.5	3.3	2.0	2.5	4.0
	4	10.1	2.8	17.6	1.6	1.5	2.3	3.1
	5	13.8	1.8	14.4	2.4	1.6	0.4	2.4
	6							
	7							
	8	13.9	5.3	18.4	3.2	3.4	1.3	3.4
	9	12.6	4.0	14.4	2.4	2.6	2.2	4.2
	10	13.9	4.0	14.1	3.5	2.6	0.6	2.2
	11	13.0	3.0	13.6	1.9	1.7	2.8	2.5
	12	13.3	3.2	14.8	3.5	0.8	2.9	2.8
	13							
	14							
	15	13.1	2.6	10.6	2.6	0.9	1.3	2.0
	16	11.6	3.4	13.7	3.3	1.0	2.1	2.5
	17	10.1	4.1	13.0	3.0	1.0	1.6	2.4
	18	13.9	4.5	11.2	1.7	2.3	1.7	3.4
	19	11.8	4.6	11.4	3.3	1.6	2.0	3.2
	20							
	21							
	22	13.7	4.9	13.0	5.6	2.4	1.1	4.3
	23	11.5	4.2	11.2	4.0	0.9	0.8	4.8
	24	15.8	3.4	22.4	5.0	1.7	2.0	3.0
	25	18.0	3.4	19.6	3.4	1.6	0.8	2.4
	26	16.0	4.2	12.8	3.4	1.6	1.0	3.4
	27							
	28							
	29	15.7	5.8	13.7	4.9	2.8	0.2	5.4
	30	14.4	5.8	15.1	5.4	4.0	0.6	5.3

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Com o cenário descrito encontrou-se resposta da função objetivo de 0.192. Em relação às três funções escalarizadas e que integram a função objetivo (2.1), observa-se que não ocorrem incumprimentos (Figura 4.22), surgem poucas limpezas (Figura 4.23) e há preferência de produção para silos – 97.3% (Figura 4.24).

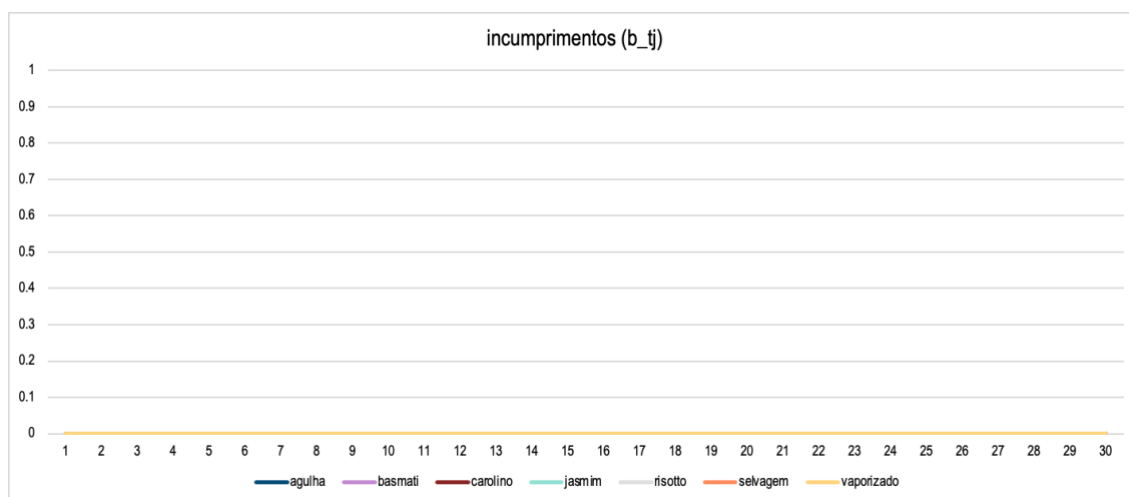


Figura 4.22 - Representação gráfica dos incumprimentos associados ao cenário base da Formulação 2.

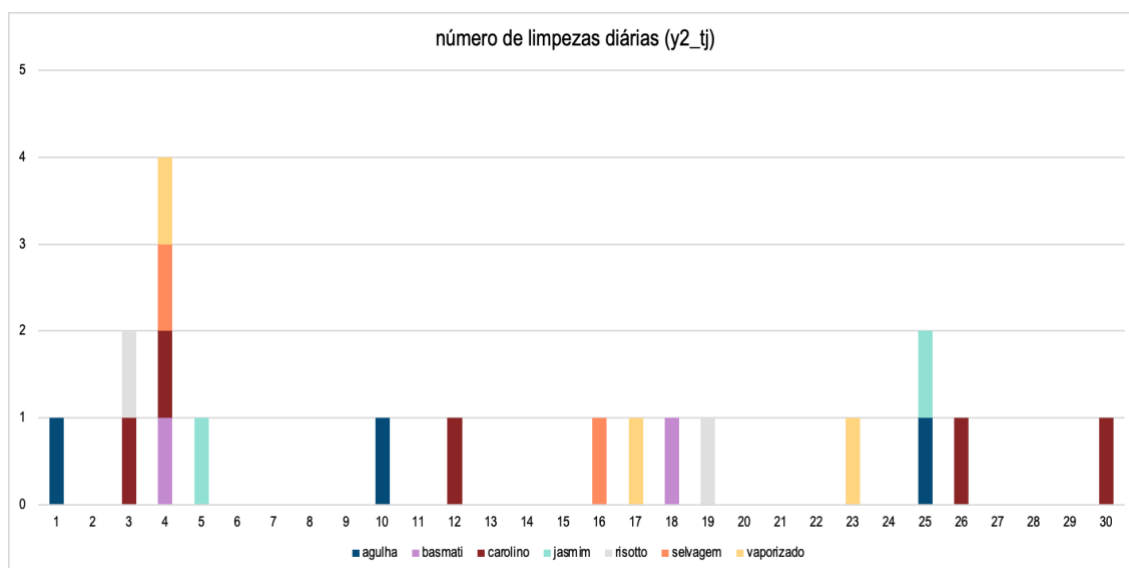


Figura 4.23 - Representação gráfica do número de limpezas diárias do cenário base da Formulação 2.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo



Figura 4.24 - Representação gráfica da produção para *big-bags*.

Olhando em pormenor para a estrutura do processo produtivo, o planeamento da produção pode ser dividido em duas fases. A primeira fase envolve os processos descasque e transformação, sendo descritos pelas variáveis $x1_{tj}$ e $x2_{tj}$. A segunda fase envolve o processo de embalagem, sendo descrito pelas variáveis $x3_{tj}$ e $x4_{tj}$. Usando esta distinção, a análise de resultados será realizada também focando em cada uma destas duas fases.

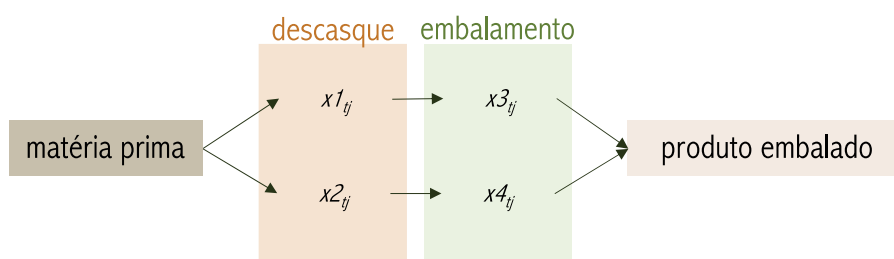


Figura 4.25 - Representação esquemática das variáveis associadas ao descasque e ao embalagem.

Partindo do descasque, serão apresentados os vários resultados da solução obtida da formulação. Na Figura 4.25, destacam-se os períodos de processamento, ao longo do mês, dos diferentes tipos de arroz e que tipo de armazenagem (silo – $x1_{tj}$, visualmente a cheio, ou *big-bag* – $x2_{tj}$, visualmente a tracejado) deverá ocorrer. As barras apresentadas na figura representam os tempos de processamento diários de cada tipo de arroz. A

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

ordenação dos tipos de arroz em cada uma dessas barras poderá não ter a ordenação correta que possibilite uma visualização coerente com a realidade, ou seja, num dia com processamento de vários produtos, a ordem desses produtos poderá estar desalinhada com a realidade, mas possibilita uma ordenação correta, dando coerência com a sequência diária de processamentos com e sem necessidade de limpezas. Esta incoerência deve-se às limitações de utilização dos gráficos no Excel, e ao facto dos dados em cada barra serem colocados por uma ordem fixa de produtos e não observando a ordem determinada pela solução.

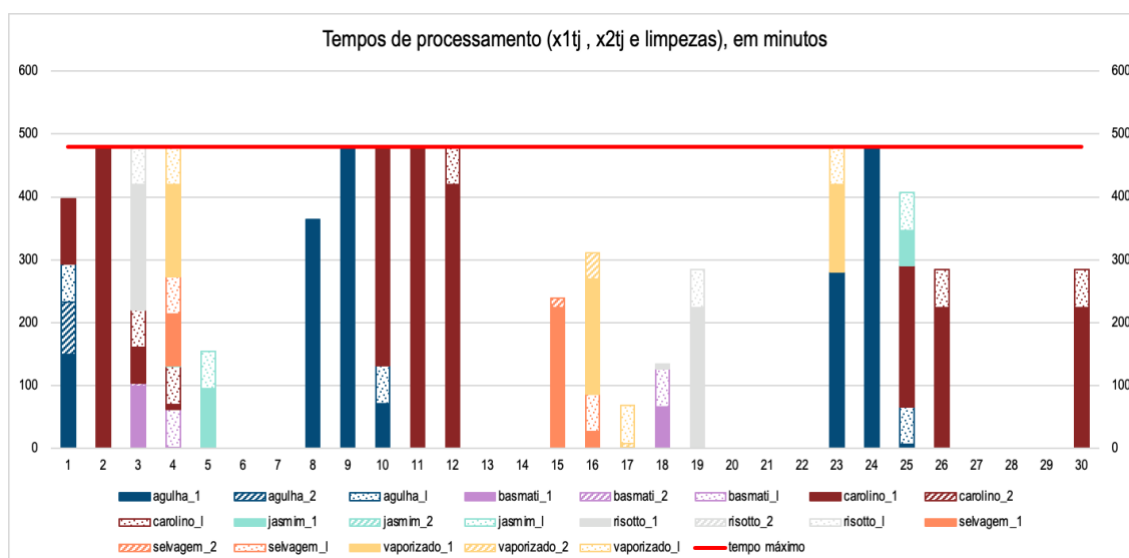


Figura 4.26 - Representação gráfica dos tempos de processamento para os produtos em estudo, diferenciando se segue para silo ($x1_{ij}$, visualmente a cheio) ou para *big-bags* ($x2_{ij}$, visualmente a tracejado), com os respetivos tempos de limpeza entre diferentes tipos de arroz, para o cenário base da Formulação 2.

Para exemplificar a observação descrita no parágrafo anterior, constata-se que nos dias 23 e 24, há processamento de Agulha para silo, Vaporizado para silo e limpeza de Vaporizado (dia 23) e Agulha para silo (dia 24). Na realidade, a ordem operacional correta deverá ser: (i) Vaporizado para silo, (ii) limpeza de Vaporizado, (iii) Agulha para silo, continuando a produção no dia 24 de Agulha para silo. Esta situação poderia ser corrigida através de um código em linguagem Visual Basic for Applications (VBA), permitindo

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

uma construção adequada do gráfico, mas pela qual não se optou, deixando essa correção para o utilizador.

Para os dados em causa, é possível observar na Figura 4.26 que, em vários dias do horizonte de planeamento, o processamento que envolve descasque não preenche a capacidade máxima disponível (assinalada pela linha a vermelho).

Este arroz processado segundo $x1_{tj}$ e $x2_{tj}$ é distribuído para silos ($s2_{tj}$) ou para *big-bags* ($s3_{tj}$). As Figura 4.27 e Figura 4.28 apresentam a quantidade de produto que é processado para produção em silos e em *big-bags*, respetivamente.

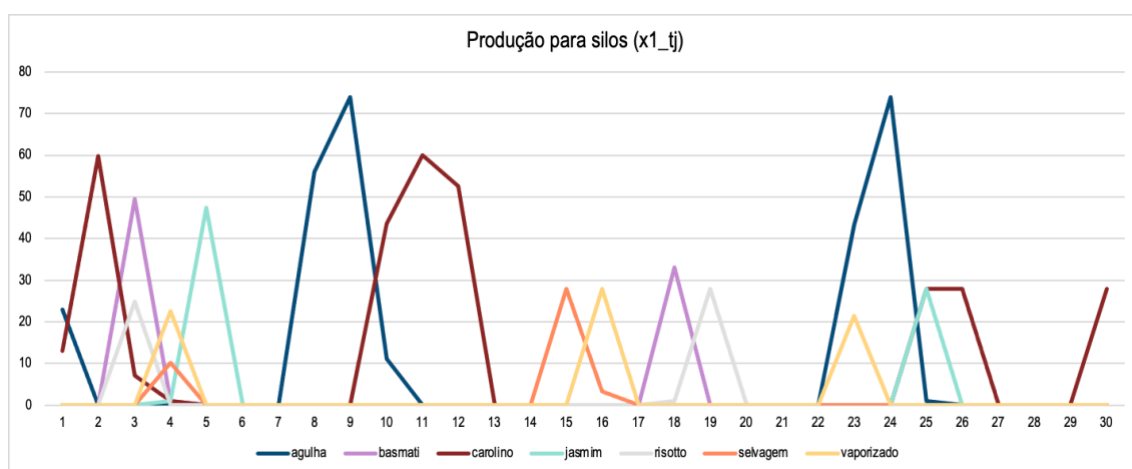


Figura 4.27 - Representação gráfica da quantidade que enviada para silos.

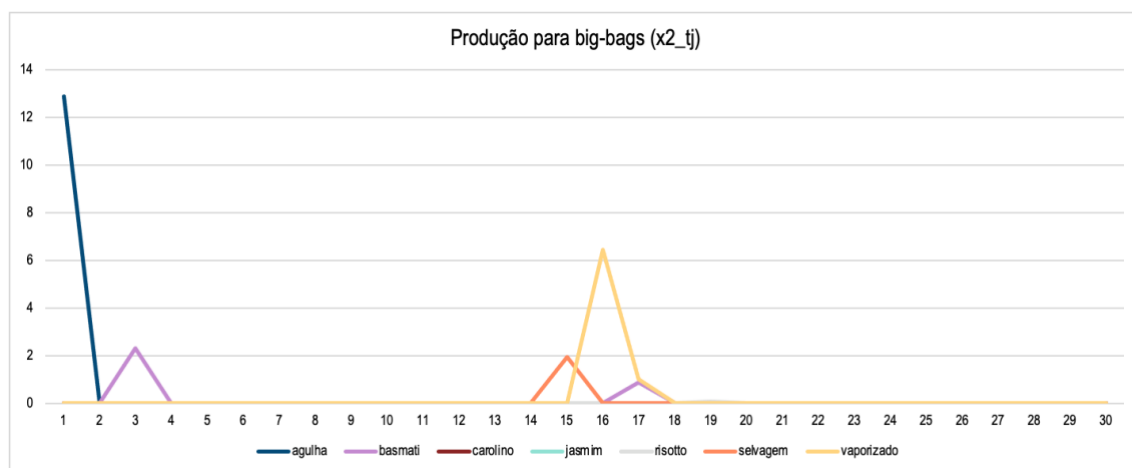


Figura 4.28 - Representação gráfica da quantidade que enviada para *big-bags*.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Paralelamente é possível saber qual a quantidade de cada tipo de arroz em *stock* quer em silos, quer em *big-bags*. A Figura 4.29 apresenta a informação da quantidade em *stock* em silos no tempo de estudo considerado.

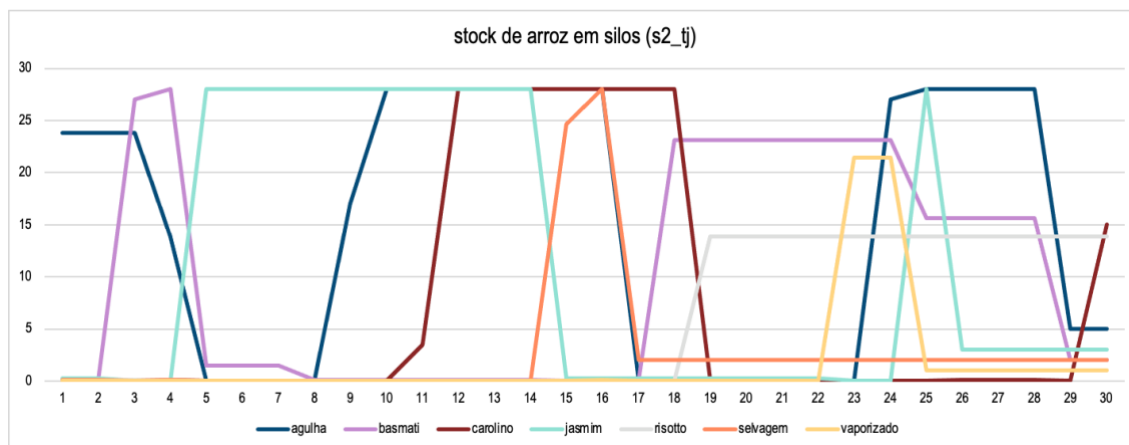


Figura 4.29 - Representação visual do *stock* de arroz em silos ($s2_{tj}$).

Tal como já referido, os silos têm uma capacidade de 28 toneladas, não havendo mistura de produtos no mesmo silo. Na Figura 4.30 apresenta-se a distribuição diária dos produtos por silo. Tal como sucedeu na representação gráfica dos tempos de processamento apresentados na Figura 4.26, a distribuição de produtos por silos pode ser realinhada de forma a ganhar maior coerência operacional. Tal como no caso anterior, esse realinhamento pode ser executado pelo agente de decisão, não pondo em causa a validade da solução obtida. A correção deste aspeto obrigaria a uma formulação mais complexa ou à utilização posterior de um código VBA para alinhar, com maior coerência, a visualização gráfica da distribuição diária de produtos em silos.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

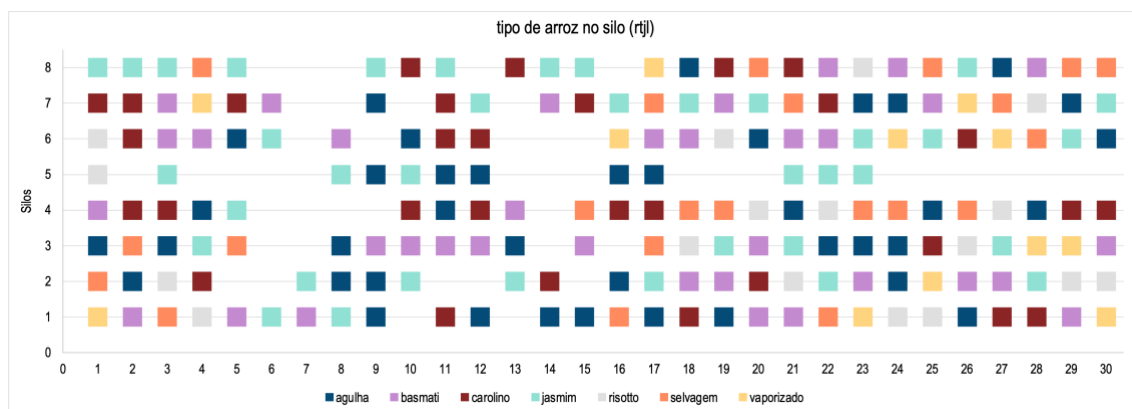


Figura 4.30 - Representação gráfica do uso dos silos no final do dia, face ao produto presente em cada, para o cenário base da Formulação 2.

A representação acima permite verificar que não ocorreu a mistura de arrozes nos silos. Exemplificando a observação feita no parágrafo anterior, torna-se importante referir que, embora se observe, por exemplo, que o produto “Agulha” se encontra no silo 3 no dia 3 e no silo 4 no dia 4, não é obrigatório que haja a movimentação de arroz – esta terá sido uma das possíveis respostas ao problema. Estas situações demonstram que a utilização da ferramenta implica simultaneamente a compreensão do meio em que será empregue e algum reajustamento por parte do agente de decisão.

A Formulação 2 estabelece que o recurso a *big-bags* é penalizado na função objetivo (ainda que em “segundo plano”), pelo que não será de estranhar que a quantidade quase sempre se mantenha constante ao longo dos vários dias, como é possível observar na Figura 4.31.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

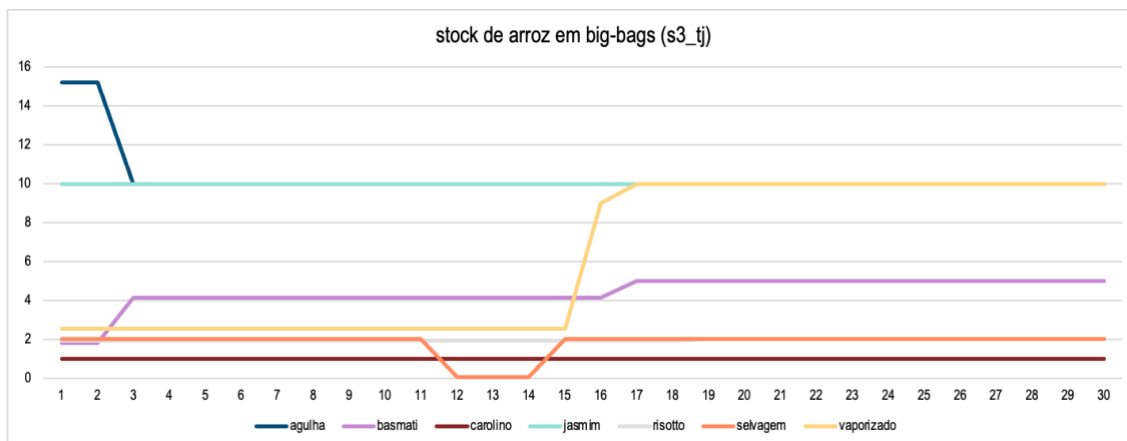


Figura 4.31 - Representação visual do stock de arroz em big-bags ($s3_{ij}$).

Analisando de seguida a fase de embalagem, é possível obter as seguintes respostas. Tal como esquematizado para o descasque, obtém-se a representação dos tempos de embalagem com a diferenciação da proveniência do arroz - Figura 4.32.

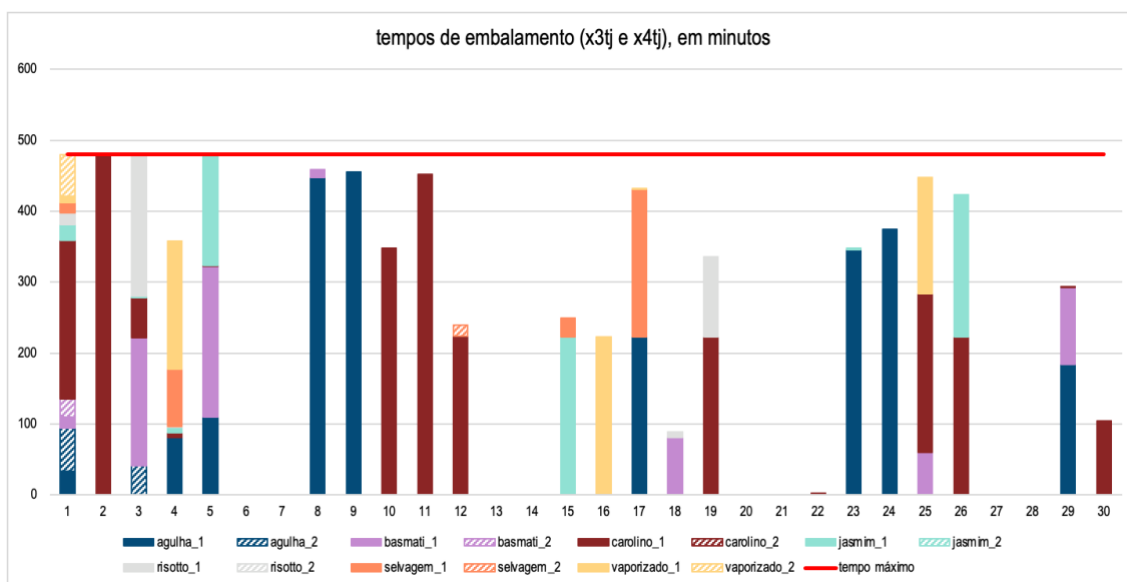


Figura 4.32 - Representação gráfica dos tempos de embalagem para os produtos em estudo, diferenciando se provêm de para silo ($x3_{ij}$, visualmente a cheio) ou de big-bags ($x4_{ij}$, visualmente a tracejado).

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Também no embalamento não há a necessidade das horas totais dos dias, sendo isso possível de ser verificado graficamente. Ao contrário do processo de descasque, não ocorre a necessidade de momentos de limpeza dos produtos. Nesse sentido, as observações na Figura 4.32 indicam apenas a proveniência do arroz. Desagregando esta informação, é possível compreender a origem do arroz para ser embalado, caso venha dos silos – Figura 4.33 – ou de *big-bags* – Figura 4.34.

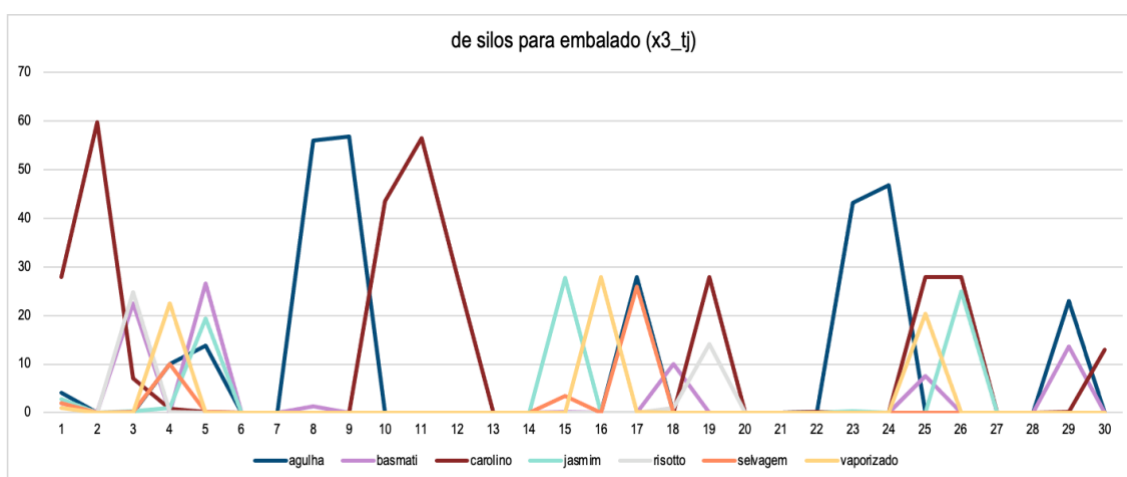


Figura 4.33 - Representação gráfica da quantidade de arroz processada de silo para produto embalado.



Figura 4.34 - Representação gráfica da quantidade de arroz processada de *big-bag* para produto embalado.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Por fim, é possível fazer um acompanhamento dos *stocks* iniciais e finais de arroz embalado – Figura 4.35 –, arroz em silos – Figura 4.36 – e em *big-bags* – Figura 4.37.

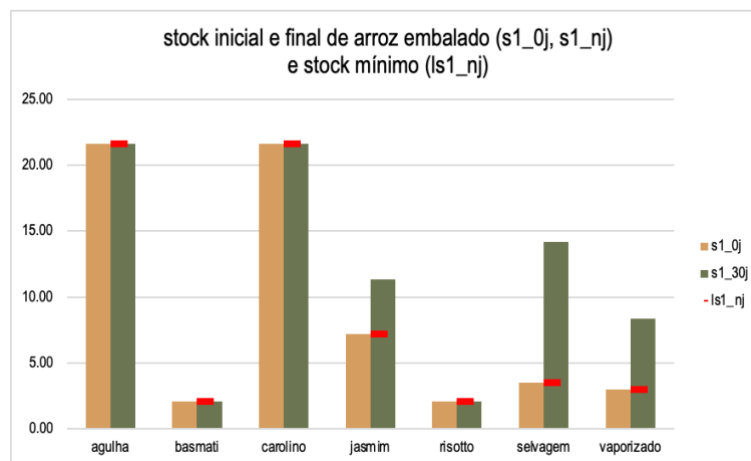


Figura 4.35 - Representação gráfica dos *stocks* iniciais e finais de arroz embalado.

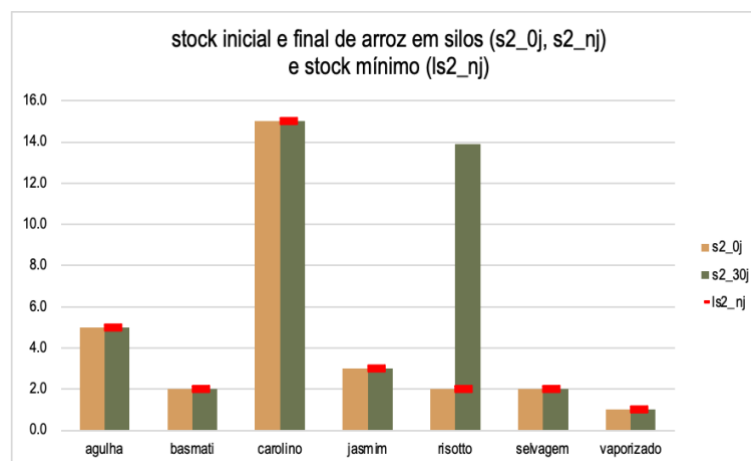


Figura 4.36 - Representação gráfica dos *stocks* iniciais e finais de arroz em silos.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

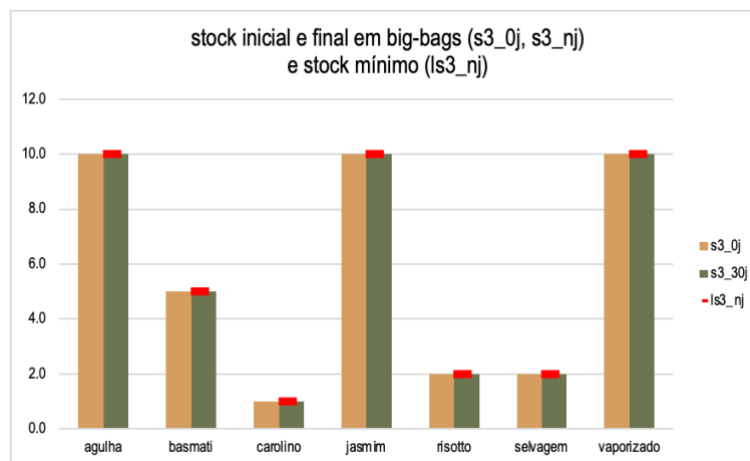


Figura 4.37 - Representação gráfica dos stocks iniciais e finais de arroz em *big-bags*.

Como é observável nas figuras acima, há *stocks* finais que ultrapassam o valor mínimo definido no problema. Na verdade, na Formulação 2, as restrições (2.8), (2.9) e (2.10) não restringem superiormente a quantidade de *stock* final em produto embalado, silos e *big-bags*, respetivamente. Estas restrições estabelecem apenas o limite mínimo para cada um dos produtos.

É de notar que há uma grande quantidade de informação que é possível obter com a Formulação 2, pelo que a apresentação dos cenários seguintes terá os pontos mais importantes e necessários para responder ao problema colocado na formulação, bem como as representações gráficas e tabelas que auxiliem à tomada de decisões.

4.2.2 Cenário B2: Variação da Procura

Tal como como na Formulação 1, fez-se variar a procura, procurando analisar variações significativas num dos parâmetros mais relevantes do problema. Deste modo, respondendo a ocorrências do meio empresarial, variou-se o parâmetro de procura (d_{ij}) em 20% em todos os dias e para todos os produtos. Primeiramente será analisado o impacto do aumento da procura e, posteriormente, a diminuição da mesma.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

4.2.2.1 Cenário B2.1: Aumento da Procura

A Figura 4.38, embora sem valores, permite ser comparada com a Figura 4.21, demonstrando que o padrão de procura é mantido, tendo um aumento de 20% face aos valores base.

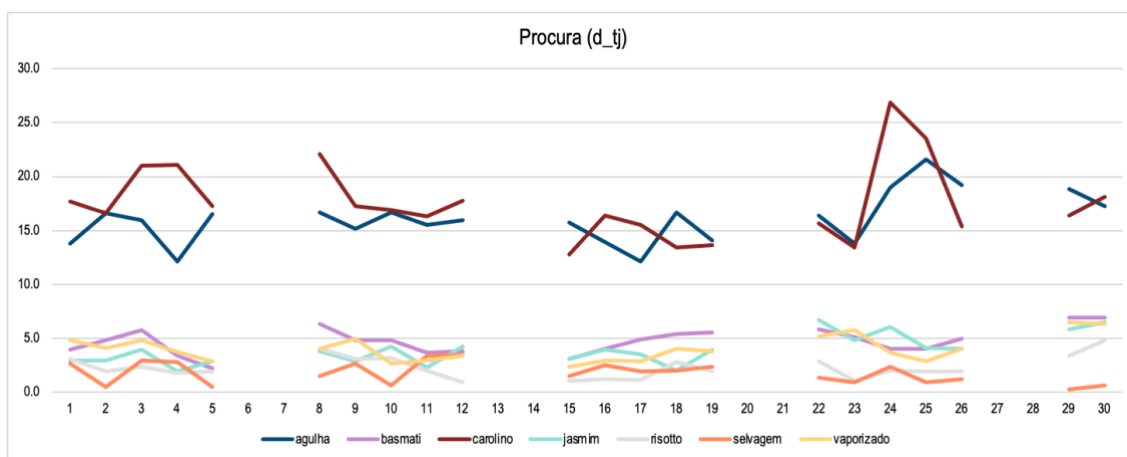


Figura 4.38 - Representação gráfica da procura perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base.

O cenário descrito levou a uma resposta da função objetivo de 0.255. Em relação às três funções que integram, escalarizadas, a função objetivo (2.1), observa-se a não existência de incumprimentos (Figura 4.39), que ocorrem poucas limpezas (Figura 4.40) e que há preferência de produção para silos – 95.4%.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

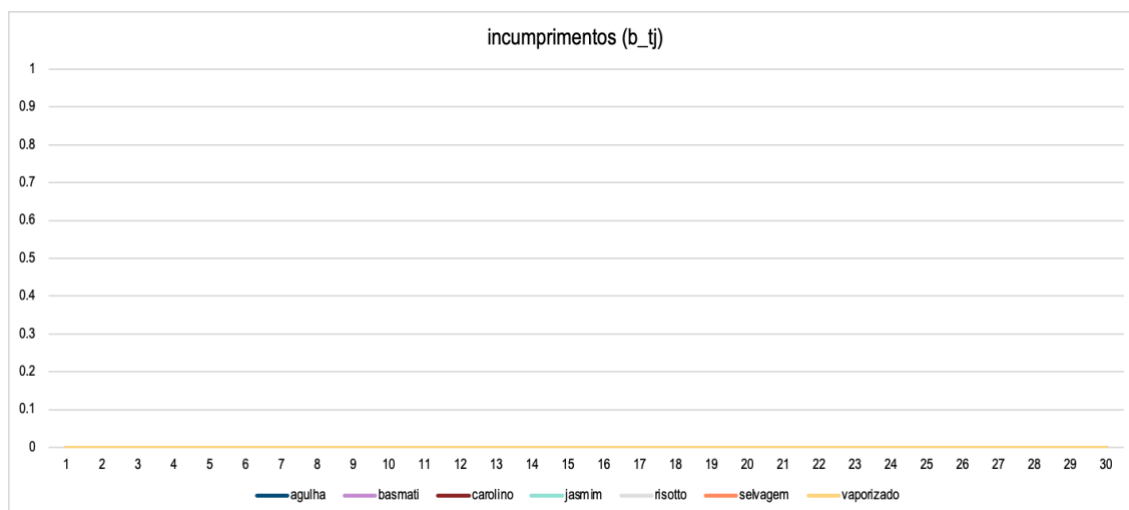


Figura 4.39 - Representação gráfica dos incumprimentos associados um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 2.

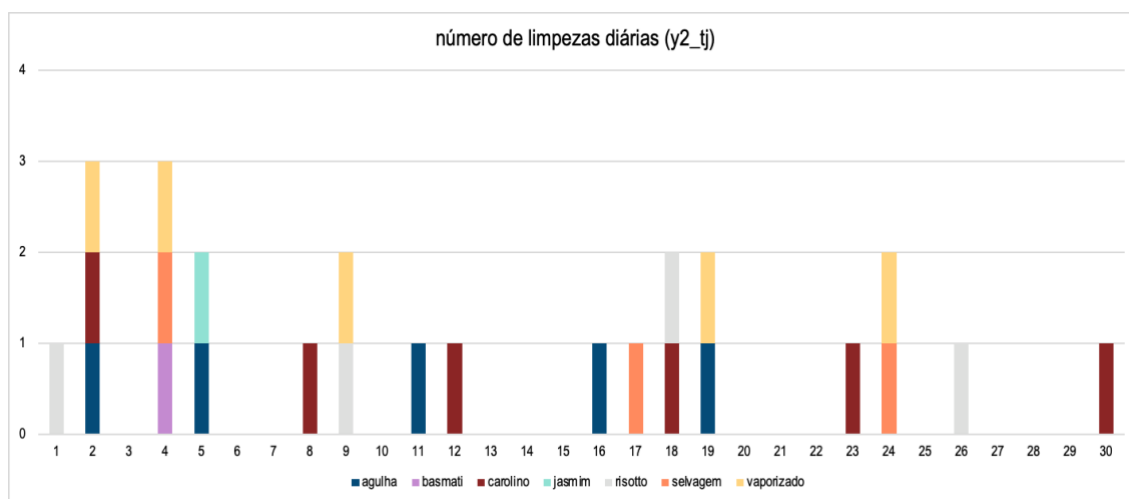


Figura 4.40 - Representação gráfica do número de limpezas diárias associados um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 2.

Iniciando com a fase de descasque, obteve-se a seguinte resposta para os tempos de processamento para os diferentes tipos de arroz e que tipo de armazenagem (silo - $x1_{tj}$, visualmente a cheio, ou *big-bag* - $x2_{tj}$, visualmente a tracejado). Esta informação encontra-se na Figura 4.41 e é complementada com a informação de usos de silos presente na Figura 4.42.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

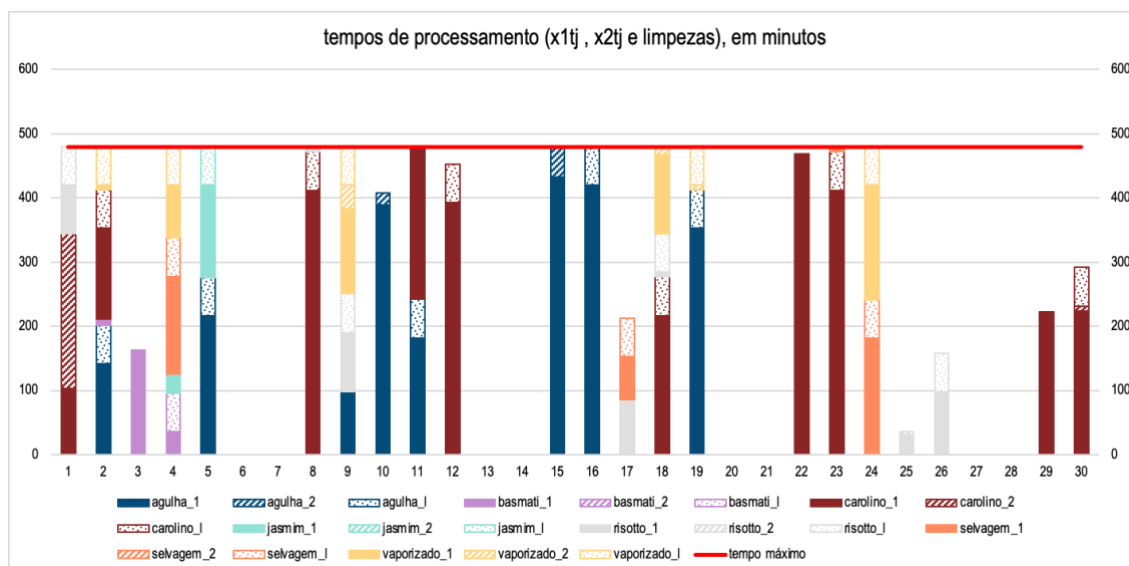


Figura 4.41 - Representação gráfica dos tempos de processamento para os produtos em estudo, diferenciando se segue para silo ($x1_{ij}$, visualmente a cheio) ou para *big-bags* ($x2_{ij}$, visualmente a tracejado), com os respetivos tempos de limpeza entre diferentes tipos de arroz, perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 2.

Tal como ocorreu no cenário base (B1), a ordem de apresentação de processamento não é coerente com o estipulado pela realidade operacional, pelos motivos anteriormente expostos, mas facilmente reordenável pelo agente de decisão. Em todo o caso, é de sublinhar que há mais dias com uma utilização plena do tempo máximo disponível.

Seguindo a preferência colocada na função objetivo, observa-se prioridade no uso de silos em vez de *big-bags*, pelo que as barras da Figura 4.41 se encontram maioritariamente a cheio. Assim, é importante também ter a visualização de como será a distribuição do uso dos silos. A Figura 4.42 permite obter essa compreensão, novamente com a ressalva de eventuais trocas diárias de produtos entre silos para dotar a solução de maior coerência operacional. Estas situações são mais notórias ao fim-de-semana, nos quais não há atividade laboral.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

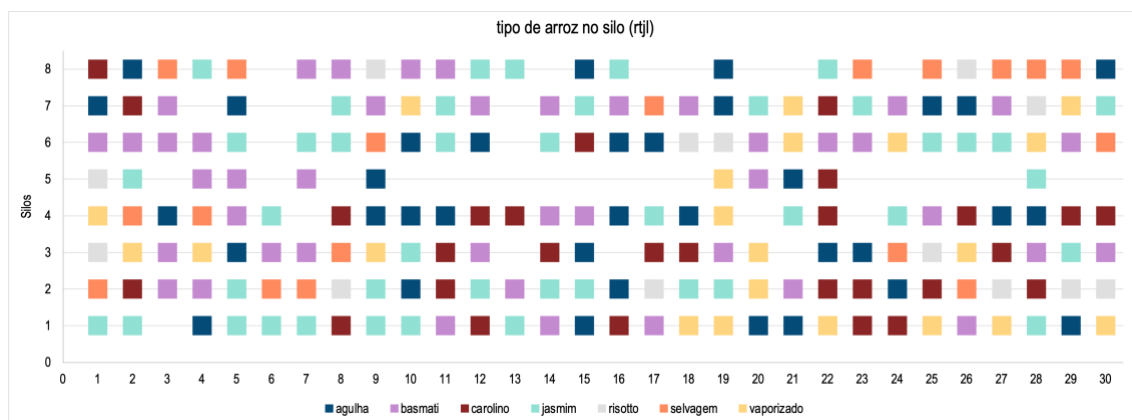


Figura 4.42 - Representação gráfica do uso dos silos no final do dia, face ao produto presente em cada, perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 2.

Uma das consequências do aumento da procura é o uso de mais horas e mais dias de processamento. Paralelamente, o uso de silos também será maior. Como é possível analisar na Figura 4.42, há muito poucos espaços vazios, ou seja, silos vazios nos vários dias.

Do mesmo modo que se verifica o baixa quantidade de produto a ser armazenada em *big-bags* (x2), a consequência direta é também haver baixa quantidade de produto a ser embalado com proveniência de *big-bags* (x4). Assim, na Figura 4.43, é identificável que a maioria das barras são a cheio, evidenciando que a maior parte do produto é originário dos silos.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

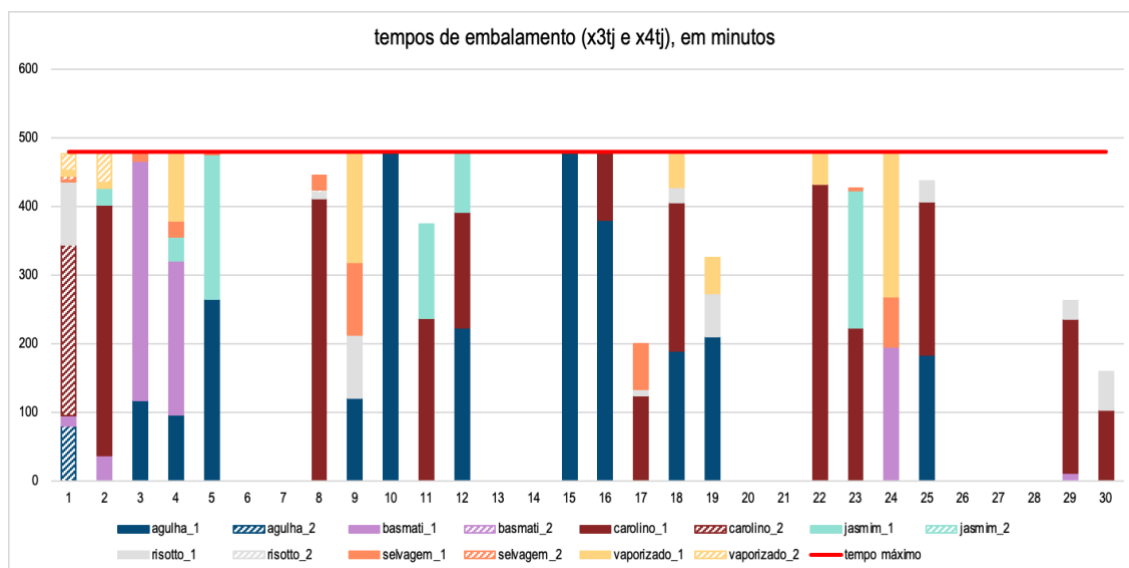


Figura 4.43 - Representação gráfica dos tempos de embalagem para os produtos em estudo, diferenciando se provem de para silo (x_{3ij} , visualmente a cheio) ou de *big-bags* (x_{4ij} , visualmente a tracejado), perante um cenário de aumento de 20% face ao cenário base da Formulação 2.

Ao mesmo tempo que se procura responder à procura, também tem de haver a garantia que os *stocks* mínimos são cumpridos. Deste modo, não só o descasque (x_1 e x_2), mas também o embalagem (x_3 e x_4) têm de ocorrer para responder às restrições de *stocks* mínimos, pelo que a laboração nos últimos dias do mês têm por objetivo focar nestas necessidades.

4.2.2.2 Cenário B2.2: Diminuição da Procura

A Figura 4.44 tem o mesmo padrão que a Figura 4.21, tendo uma diminuição de 20% face aos valores base.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

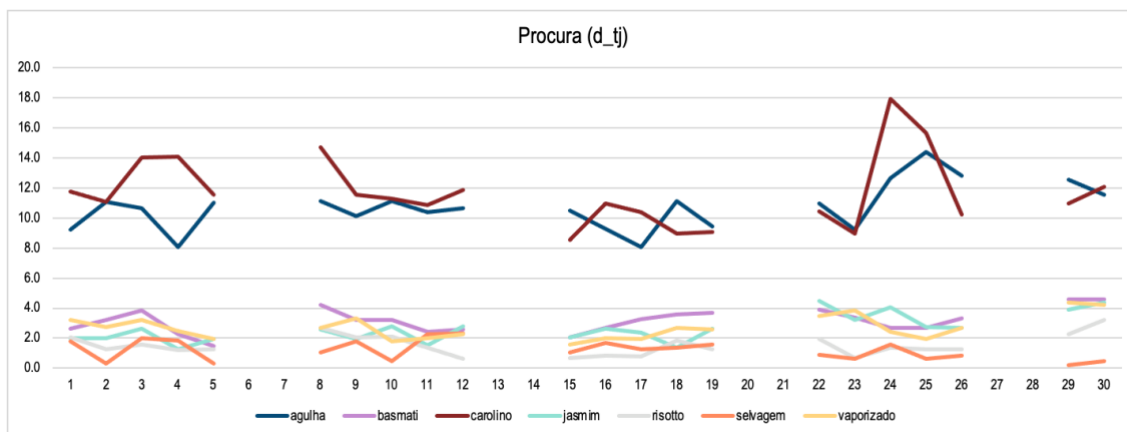


Figura 4.44 - Representação gráfica da procura perante um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 2.

O cenário descrito levou a uma resposta da função objetivo de 0.122. Em relação às três funções que integram, escalarizadas, a função objetivo (2.1), observa-se a não existência de incumprimentos (Figura 4.45), que ocorrem poucas limpezas (Figura 4.46) e que há preferência de produção para silos – 97.1%.

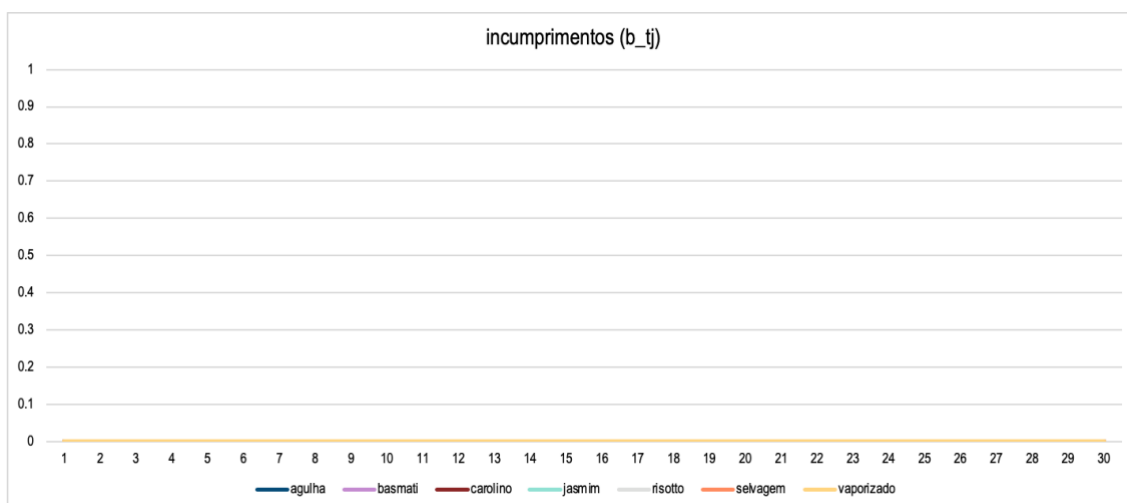


Figura 4.45 - Representação gráfica dos incumprimentos associados um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 2.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

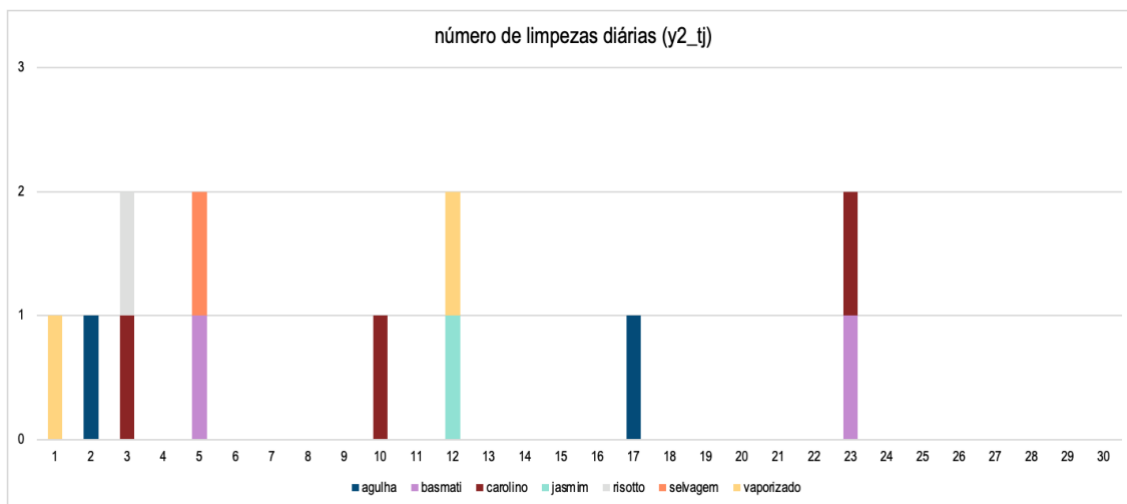


Figura 4.46 - Representação gráfica do número de limpezas diárias associados um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 2.

A primeira parte do processo a analisar é a fase de descasque. Sendo marcada uma redução de 20% na procura, será expectável que os vários pontos chave do processo demonstrem diminuição. Deste modo, a Figura 4.47 pretende mostrar os tempos de processamento para cumprir a procura.

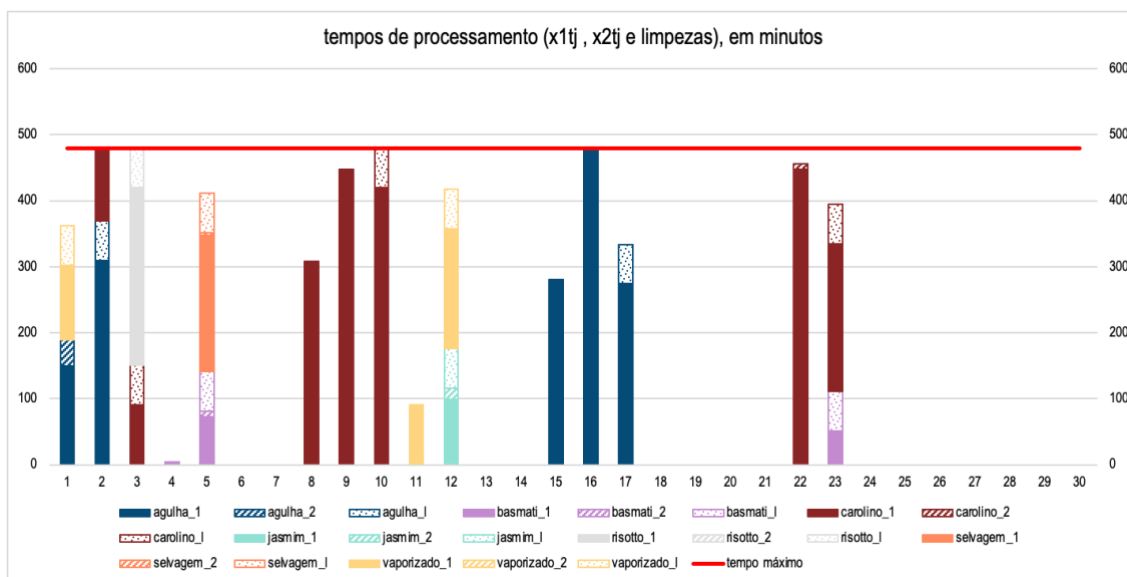


Figura 4.47 - Representação gráfica dos tempos de processamento para os produtos em estudo, diferenciando se segue para silo ($x1_{tj}$, visualmente a cheio) ou para *big-bags* ($x2_{tj}$, visualmente a tracejado), com os respetivos tempos de limpeza entre diferentes tipos de arroz, para o cenário base da Formulação 2.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Como é observável na figura acima, o processo de descasque ocorre somente em quinze dos vinte e dois dias úteis definidos. Embora representem apenas 70% dos dias úteis, destaca-se que somente três dos quinze dias têm um aproveitamento total do tempo. A figura seguinte (Figura 4.48) apresenta a organização dos silos em que, embora a procura seja reduzida face ao cenário base, continuam a ser utilizados bastantes silos.

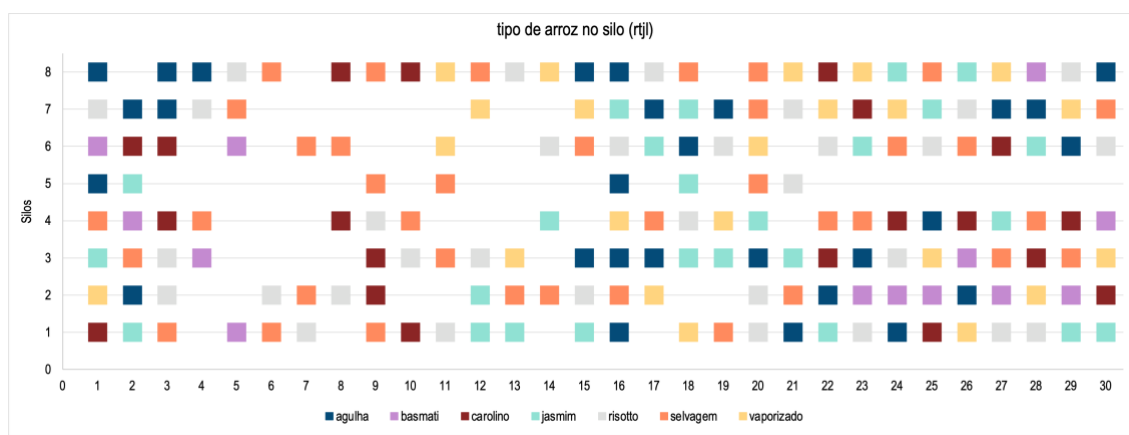


Figura 4.48 - Representação gráfica do uso dos silos no final do dia, face ao produto presente em cada, perante um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 2

Com a diminuição da procura, também a fase de embalagem terá menos atividade. A Figura 4.49 apresenta os tempos de embalagem necessários tanto para responder à procura, como para responder aos limites mínimos de *stock* definidos.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

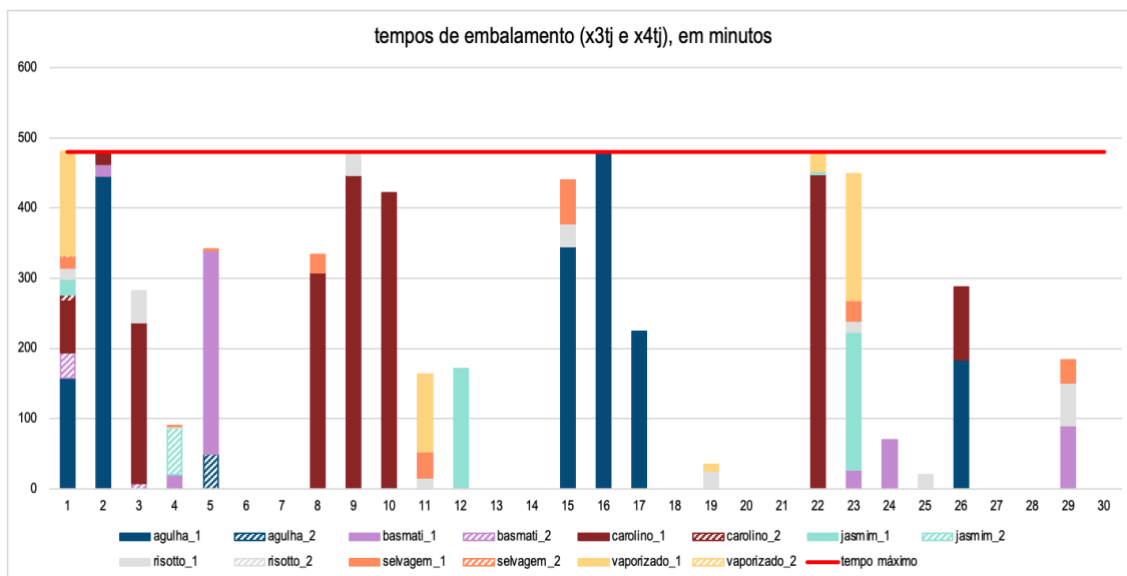


Figura 4.49 - Representação gráfica dos tempos de embalagem para os produtos em estudo, diferenciando se provêm de para silo (x_{3tj} , visualmente a cheio) ou de *big-bags* (x_{4tj} , visualmente a tracejado), perante um cenário de diminuição de 20% face ao cenário base da Formulação 2.

Comparação B1-B2

Primeiramente, apresentam-se as informações relativas à resolução destes cenários que se encontram na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 - Tabela resumo dos parâmetros do OpenSolver para cada cenário em estudo (B1 e B2) da Formulação 2.

	Cenário B1	Cenário B2.1	Cenário B2.2
Resultado	Por tempo limite	Por tempo limite	Por tempo limite
Solução ótima	0.192	0.255	0.122
Valor da melhor solução admissível	0.002	0.020	0.001
Gap (%)	90.86	11.58	182.96
Número de nodos	961	1 234	1 313
Total de iterações	282 261	213 769	227 543
Tempo (CPU)	150.19	150.27	150.12
Tempo (Wallclock)	178.62	184.64	185.70

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Perante os cenários em estudo, é indispensável comparar os diferentes resultados de destaque operacional do problema. Assim, a Tabela 4.21 permite resumir as informações referentes à minimização da procura, limpezas e preferência por utilização de silos ($z2$), à resposta da função objetivo (2.1), número total de limpezas realizadas (L_{total}) e a percentagem de utilização de silos face a *big-bags* (U_{silos}).

A obtenção destes valores segue as equações abaixo apresentadas:

$$L_{total} = \sum_{t=1}^{30} \sum_{j=1}^7 y_{2tj}, t=1, \dots, n, j=1, \dots, 7 \quad (3.9)$$

$$S = \sum_{t=1}^{30} x_{1tj}, t=1, \dots, n, j=1, \dots, 7 \quad (3.10)$$

$$B = \sum_{t=1}^{30} x_{2tj}, t=1, \dots, n, j=1, \dots, 7 \quad (3.11)$$

$$U_{silos}(\%) = \frac{S}{S+B} \times 100 \quad (3.12)$$

A tabela apresenta ainda valores relativos à taxa de variação percentual entre o cenário base e o cenário a ser analisado para minimização da procura, limpezas e preferência por utilização de silos ($z2$), o número de limpeza (L_{total}) e a percentagem de utilização de silos face a *big-bags* (U_{silos}). Este valor é obtido pelo quociente entre a diferença entre os valores do cenário de variação em estudo e o cenário B1 e o valor do cenário B1. As expressões (3.13) a (3.15) identificam os cálculos de variação dos três pontos descritos acima, em que:

$$Gap_5 = \begin{cases} \frac{z2_{B2.1} - z2_{B1}}{z2_{B1}} \times 100, \text{entre B2.1 e B1} \\ \frac{z2_{B2.2} - z2_{B1}}{z2_{B1}} \times 100, \text{entre B2.2 e B1} \end{cases} \quad (3.13)$$

$$Gap_6 = \begin{cases} \frac{L_{total\ B2.1} - L_{total\ B1}}{L_{total\ B1}} \times 100, \text{entre B2.1 e B1} \\ \frac{L_{total\ B2.2} - L_{total\ B1}}{L_{total\ B1}} \times 100, \text{entre B2.2 e B1} \end{cases} \quad (3.14)$$

$$Gap_7 = \begin{cases} \frac{U_{silos\ B2.1} - U_{silos\ B1}}{U_{silos\ B1}} \times 100, \text{entre B2.1 e B1} \\ \frac{U_{silos\ B2.2} - U_{silos\ B1}}{U_{silos\ B1}} \times 100, \text{entre B2.2 e B1} \end{cases} \quad (3.15)$$

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Tabela 4.21 - Tabela resumo da resposta dos cenários em estudo (B1 e B2) da Formulação 2.

	$z2$		Número de limpezas L_{total}		Utilização de silos U_{silos}	
		Gap_5		Gap_6		Gap_7
Cenário B1	0.192		19		97.3%	
Cenário B2.1	0.255	32.5%	25	31.6%	95.4%	-1.9%
Cenário B2.2	0.122	-36.6%	12	-36.8%	97.1%	-0.3%

Como se verifica na Tabela 4.21, o aumento da procura leva a um valor de resposta maior elevado face ao cenário base. Consequentemente, também ocorrem mais limpezas no processo. Por sua vez, a diminuição de procura provoca uma resposta no sentido contrário. Face à utilização de silos em valor percentual, em ambos os cenários de variação há menor uso percentual. Esta ocorrência era expectável no caso do cenário B2.1, mas não no cenário B2.2, pois esperava-se que uma menor procura não originasse a necessidade de usar a matéria armazenada em *big-bags* e, assim, fazer uso direto do descasque para o embalamento ($x1 \rightarrow x3$). Porém, analisando os números absolutos dos valores totais de produto que segue para silo ($x1$) e para *big-bag* ($x2$), observa-se que quanto maior a procura, maior a tendência de uso de produtos em *big-bag*.

A Tabela 4.22 apresenta as quantidades de procura das diferentes matérias-primas ($P_{produto}$), com as variações de toneladas que se encontram envolvidas por produto ($\Delta P_{produto}$) e o que representa esse valor em percentagem. Exemplificando, a obtenção dos valores presentes na tabela referente ao cenário B2.1 segue a equação e expressões abaixo apresentadas:

$$P_{produto} = \sum_{t=1}^{30} d_{tj}, j=1, \dots, 7 \quad (3.16)$$

$$\Delta P_{produto} = \begin{cases} P_{produto\ B2.1} - P_{produto\ B1}, & \text{entre B2.1 e B1} \\ P_{produto\ B2.2} - P_{produto\ B1}, & \text{entre B2.2 e B1} \end{cases} \quad (3.17)$$

$$Gap_8 = \begin{cases} \frac{P_{produto\ B2.1} - P_{produto\ B1}}{P_{produto\ B1}} \times 100, & \text{entre B2.1 e B1} \\ \frac{P_{produto\ B2.2} - P_{produto\ B1}}{P_{produto\ B1}} \times 100, & \text{entre B2.2 e B1} \end{cases} \quad (3.18)$$

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Tabela 4.22 - Tabela resumo da procura total por produto para os cenários B1 e B2

	Cenário B1	Cenário B2.1			Cenário B2.2		
	$P_{produto}$	$P_{produto}$	$\Delta P_{produto}$	Gap_8	$P_{produto}$	$\Delta P_{produto}$	Gap_8
Agulha	294.8	353.8	59.0	20.00%	235.8	-59.0	-20.00%
Basmati	86.9	104.3	17.4	20.00%	69.5	-17.4	-20.00%
Carolino	321.0	385.2	64.2	20.00%	256.8	-64.2	-20.00%
Jasmim	72.3	86.8	14.5	20.00%	57.9	-14.5	-20.00%
Risotto	42.1	50.5	8.4	20.00%	33.7	-8.4	-20.00%
Selvagem	32.8	39.4	6.6	20.00%	26.2	-6.6	-20.00%
Vaporizado	74.1	88.9	14.8	20.00%	59.3	-14.8	-20.00%

A característica aplicada para os cenários definidos neste tópico era a procura. A variação aplicada pode ser confirmada na Tabela 4.22.

Torna-se fulcral analisar os resultados perante os dois cenários em análise envolvendo a Formulação 2. Deste modo, a Tabela 4.23 permite analisar a quantidade de matéria-prima a ser enviada para o processo de descasque por produto ($Q_{produto}$). Nesta tabela não será analisada a especificidade de armazenamento (silos ou *big-bags*), mas será comparado os valores envolvidos entre os cenários em análise ($\Delta Q_{produto}$), bem como a variação percentual a nesses parâmetros, segundo a equação e expressões abaixo descritas:

$$Q_{produto} = \sum_{t=1}^{30} x1_{tj} + \sum_{t=1}^{30} x2_{tj}, j=1, \dots, 7 \quad (3.19)$$

$$\Delta Q_{produto} = \begin{cases} Q_{produto B2.1} - Q_{produto B1}, \text{entre B2.1 e B1} \\ Q_{produto B2.2} - Q_{produto B1}, \text{entre B2.2 e B1} \end{cases} \quad (3.20)$$

$$Gap_9 = \begin{cases} \frac{Q_{produto B2.1} - Q_{produto B1}}{Q_{produto B1}} \times 100, \text{entre B2.1 e B1} \\ \frac{Q_{produto B2.2} - Q_{produto B1}}{Q_{produto B1}} \times 100, \text{entre B2.2 e B1} \end{cases} \quad (3.21)$$

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Tabela 4.23 - Tabela resumo de quantidades enviadas para descasque, ou seja, total para silos (x_1) e big-bags (x_2).

	Cenário B1	Cenário B2.1			Cenário B2.2		
	$Q_{produto}$	$Q_{produto}$	$\Delta Q_{produto}$	Gap_9	$Q_{produto}$	$\Delta Q_{produto}$	Gap_9
Agulha	294.8	353.8	59.0	20.00%	235.8	-59.0	-20.00%
Basmati	86.9	104.3	17.4	20.00%	69.5	-17.4	-20.00%
Carolino	321.0	385.2	64.2	20.00%	256.8	-64.2	-20.00%
Jasmim	76.4	86.8	10.3	<u>13.53%</u>	57.9	-18.6	<u>-24.31%</u>
Risotto	54.0	50.5	-3.5	<u>-6.46%</u>	33.7	-20.3	<u>-37.64%</u>
Selvagem	43.5	51.0	7.6	<u>17.37%</u>	26.2	-17.2	<u>-39.62%</u>
Vaporizado	79.4	88.9	9.5	<u>11.93%</u>	59.3	-20.2	<u>-25.38%</u>

Para os produtos Agulha, Basmati e Carolino, verifica-se a variação de 20% em ambos os cenários, em que, perante o aumento ou diminuição da procura, o valor é positivo ou negativo, respetivamente. Por outro lado, os restantes quatro produtos não revelam essa resposta. Para melhor compreender esta situação, será importante analisar também os valores de *stocks* envolvidos – Figura 4.50, Figura 4.51 e Figura 4.52 apresentadas abaixo.

Procurou-se também verificar a tendência anterior para as quantidades enviadas para embalagem - Tabela 4.24. Deste modo, aplicou-se de forma semelhante o princípio que se fez para o descasque, seguindo a equação e expressões abaixo apresentadas:

$$E_{produto} = \sum_{t=1}^{30} x_{3tj} + \sum_{t=1}^{30} x_{4tj}, j=1, \dots, 7 \quad (3.22)$$

$$\Delta E_{produto} = \begin{cases} E_{produto\ B2.1} - E_{produto\ B1}, \text{entre B2.1 e B1} \\ E_{produto\ B2.2} - E_{produto\ B1}, \text{entre B2.2 e B1} \end{cases} \quad (3.23)$$

$$Gap_{10} = \begin{cases} \frac{E_{produto\ B2.1} - E_{produto\ B1}}{E_{produto\ B1}} \times 100, \text{entre B2.1 e B1} \\ \frac{E_{produto\ B2.2} - E_{produto\ B1}}{E_{produto\ B1}} \times 100, \text{entre B2.2 e B1} \end{cases} \quad (3.24)$$

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Tabela 4.24 - Tabela resumo de quantidades enviadas para embalagem, ou seja, vinda de silos (x_3) e big-bags (x_4).

	Cenário B1	Cenário B2.1			Cenário B2.2		
	$E_{produto}$	$E_{produto}$	$\Delta E_{produto}$	Gap_10	$Q_{produto}$	$\Delta E_{produto}$	Gap_10
Agulha	294.8	353.8	59.0	20.00%	235.8	-59.0	-20.00%
Basmati	86.9	104.3	17.4	20.00%	69.5	-17.4	-20.00%
Carolino	321.0	385.2	64.2	20.00%	256.8	-64.2	-20.00%
Jasmim	76.4	86.8	10.3	<u>13.53%</u>	57.9	-18.6	<u>-24.31%</u>
Risotto	42.1	50.5	8.4	20.00%	33.7	-8.4	-20.00%
Selvagem	43.5	39.4	-4.1	<u>-9.43%</u>	26.2	-17.2	<u>-39.62%</u>
Vaporizado	79.4	88.9	9.5	<u>11.93%</u>	59.3	-20.2	<u>-25.38%</u>

Nesta fase de processamento, os valores de variação entre o cenário em análise e o cenário B1 que foram diferentes a 20%, a variação aplicada na procura, foram identificados para os produtos Jasmim, Selvagem e Risotto. Tal como nas quantidades associadas ao descasque, esta informação deve ser analisada à luz dos *stocks* envolvidos – Figura 4.50, Figura 4.51 e Figura 4.52.

Atentando à Formulação 2, sabe-se que os limites de quantidade impostos foram relativos de espaço em silos e de quantidades mínimas de produto em *stock*. Tal implica que a solução apresentada pode assumir quantidades superiores às necessárias para responder à procura. Porém, os dois pontos discordantes nas Tabela 4.23 e Tabela 4.24 são o Risotto e o Selvagem, respetivamente, para o cenário B2.1. A solução gerada mostra que é necessário descascar menos 3.5 ton de Risotto e embalar menos 4.1 ton de Selvagem para responder a uma procura 20% superior face ao cenário base (B1).

Por fim, é importante averiguar os *stocks* finais e comparar com os valores definidos para valor mínimo. A Figura 4.50 apresenta a informação relativa a produto embalado.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

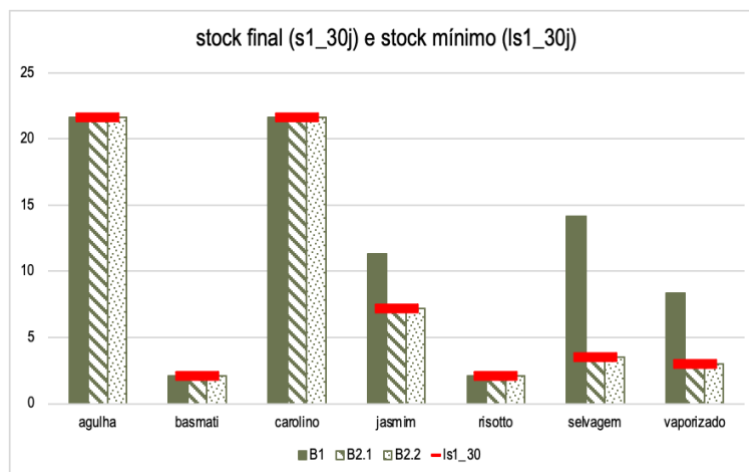


Figura 4.50 - Representação gráfica do *stock* de produto embalado final para os cenários em estudo e do *stock* mínimo definido.

Como é observável, o limite mínimo ($ls1_{30j}$) é respeitado para todos os produtos. No caso do cenário base (B1), o limite é ultrapassado para Jasmim, Selvagem e Risotto. Esta informação vem complementar o que foi analisado na Tabela 4.24. Dado que a variação calculada pela fórmula (3.24) parte da comparação face ao cenário base, se este tem um *stock* final superior ao dos cenários da variação, o valor de variação estará influenciado pelo *stock* final de B1. A mesma análise foi realizada para os *stocks* finais em silo e o limite de *stock* mínimo - Figura 4.51.

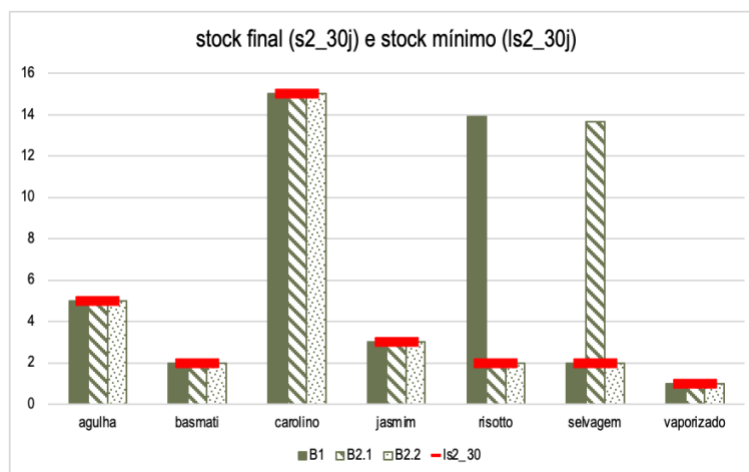


Figura 4.51 - Representação gráfica do *stock* de produto em silos para os cenários em estudo e do *stock* mínimo definido.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Nas existências finais de silos é visível que o limite foi ultrapassado no cenário base (B1) para Risotto. Deste modo, é possível afirmar que o valor de Risotto na Tabela 4.23 se encontra também influenciado pela elevada ação de descasque (x_1 e x_2) no cenário base e, consequentemente, nas existências finais.

Por fim, é possível analisar os *stocks* finais em *big-bags*, comparando com o *stock* mínimo. Atendendo à condição que limita superiormente o *stock* total diário em *big-bags*, definida na restrição (2.14), é de esperar que esses valores de *stock* sejam todos iguais, o que se verifica na Figura 4.52.

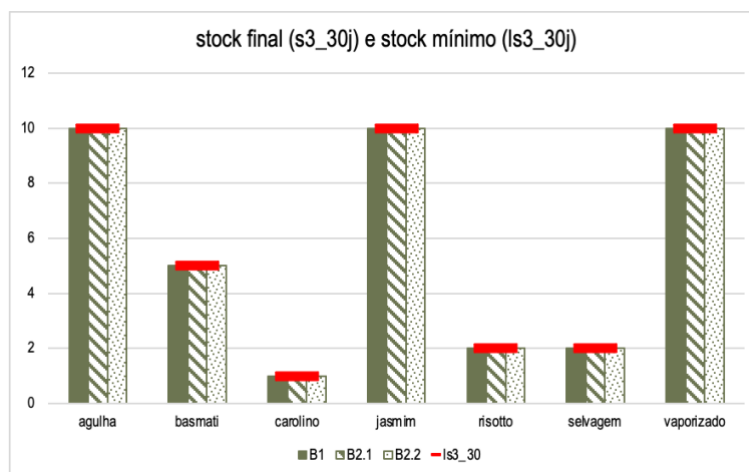


Figura 4.52 - Representação gráfica do *stock* de produto em *big-bags* para os cenários em estudo e do *stock* mínimo definido.

4.2.3 Cenário B3: Variação da Horas de Trabalho

Para além da variação face à procura, há outros parâmetros que podem ser analisados. Embora possa ser uma consequência da procura existente, aumentar ou diminuir o número de horas disponíveis de trabalho acarretam várias alterações a níveis operacionais. Mantendo o parâmetro de procura (d_{ij}) do cenário B1, neste subcapítulo será analisado o impacto da variação das horas de trabalho. Assim, neste subcapítulo serão apresentados os cenários B3.1, B3.2, B3.3a e B3.3b, com como a comparação com o cenário base. Os parâmetros a alertar poderão ser consultados na Tabela 4.18.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

4.2.3.1 Cenário B3.1: Mais Horas Semanais Disponíveis

O princípio operacional no qual se baseia este cenário é o aumento do tempo de laboração de oito horas diárias (480 minutos) para quinze horas diárias (900 minutos).

O cenário descrito levou a uma resposta da função objetivo de 0.160. Em relação às três funções que integram, escalarizadas, a função objetivo (2.1), observa-se a não existência de incumprimentos de entregas, que há dezasseis limpezas no descasque e que há preferência de produção para silos – 99.6%.

As Figura 4.53 e Figura 4.54 apresentam a solução obtida dos tempos envolvidos para a área de descasque e de embalagem, respetivamente. Se compararmos estas imagens com as figuras (ir ao cenário base), permitem analisar quais as principais diferenças que o aumento de tempo de laboração origina nas duas fases.

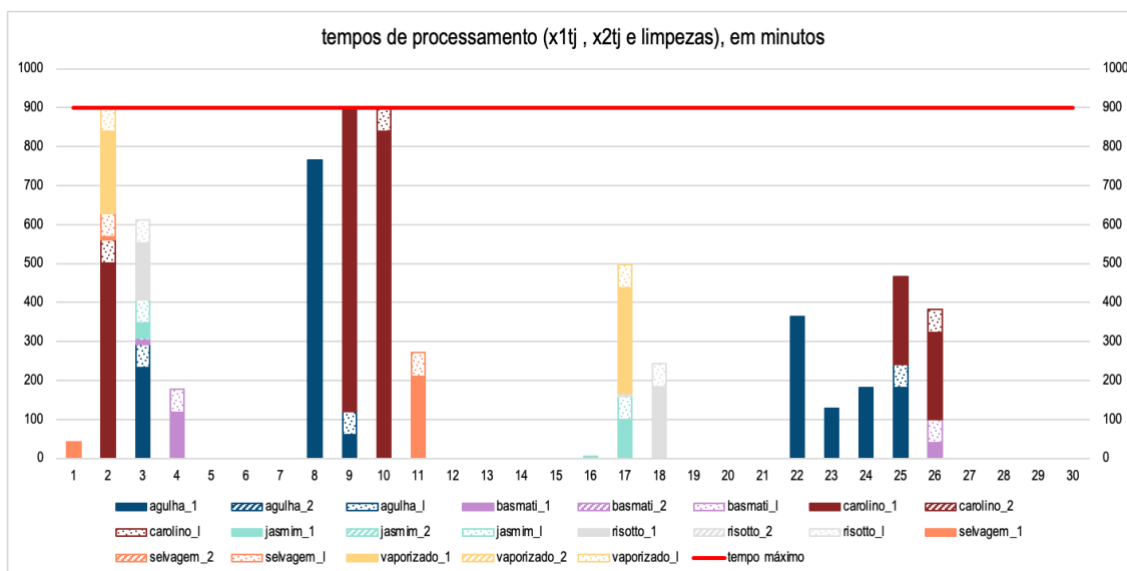


Figura 4.53 - Representação gráfica dos tempos de processamento para os produtos em estudo, diferenciando se segue para silo ($x1_{tj}$, visualmente a cheio) ou para *big-bags* ($x2_{tj}$, visualmente a tracejado), com os respetivos tempos de limpeza entre diferentes tipos de arroz, perante um cenário de aumento de tempo de laboração ao cenário base da Formulação 2.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

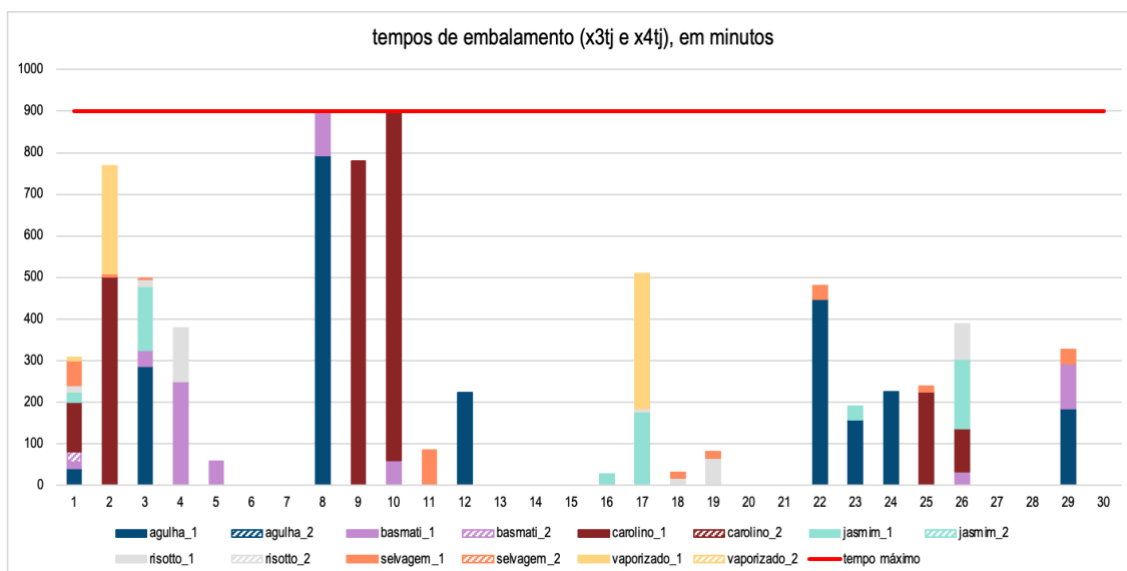


Figura 4.54 - Representação gráfica dos tempos de embalagem para os produtos em estudo, diferenciando se provem de para silo (x_{3tj} , visualmente a cheio) ou de *big-bags* (x_{4tj} , visualmente a tracejado), perante um cenário de aumento de tempo de laboração face ao cenário base da Formulação 2.

Na Figura 4.53, perante a fase de descasque, é possível identificar que somente três dos vinte e dois dias úteis é que têm um aproveitamento total das horas disponíveis. Por sua vez, no embalagem, somente dois dos vinte e dois dias úteis seriam utilizados no tempo disponível – Figura 4.54. Deste modo, o aumento do período de laboração para 15 horas é muito desaproveitado em termos laborais, tornando-se útil apenas se se verificasse um aumento (significativo) da procura.

4.2.3.2 Cenário B3.2: Menos Horas Semanais Disponíveis

A popularidade da semana de quatro dias de trabalho tem aumentado nos últimos anos, não só devido aos benefícios para os funcionários bem como para a entidade empregadora. Uma das principais vantagens que é referida é o aumento da produtividade, por se ter funcionários mais descansados e motivados. A nível empresarial, a redução do tempo de trabalho também contribuir para uma maior sustentabilidade ambiental, com menor consumo de recursos. No entanto, a implementação bem-sucedida requer um planeamento cuidadoso para atender às necessidades do negócio.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Se por um lado a nível operacional se possa suprimir dias de trabalho, há serviços na empresa que têm que laborar nos cinco dias tradicionais. Face a esta situação, a procura manterá a distribuição definida no cenário base (B1).

Em termos práticos, foi definido que a semana de quatro dias ocorreria num padrão de primeiramente quatro dias de trabalho e, posteriormente, três dias de descanso. O cenário descrito levou a uma resposta da função objetivo de 0.173. Em relação às três funções que integram, escalarizadas, a função objetivo (2.1), observa-se a não existência de incumprimentos de entregas, que são realizadas dezassete limpezas e que há preferência de produção para silos – 96.4%.

A Figura 4.55 permite analisar a distribuição dos tempos de processamento associados à fase de descasque.

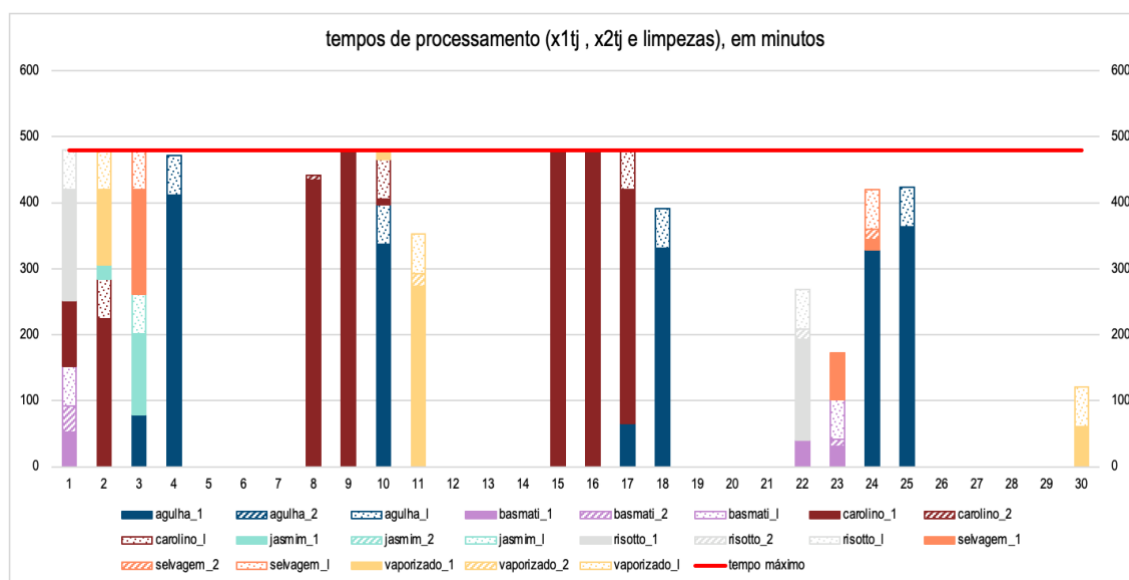


Figura 4.55 - Representação gráfica dos tempos de processamento para os produtos em estudo, diferenciando se segue para silo (x_{1ij} , visualmente a cheio) ou para *big-bags* (x_{2ij} , visualmente a tracejado), com os respetivos tempos de limpeza entre diferentes tipos de arroz, perante um cenário de diminuição de tempo de laboração semanal face ao cenário base da Formulação 2.

Comparativamente com a solução do cenário B1, a primeira diferença que se observa é a utilização quase total do tempo disponível para os vários dias em análise (recorde-se que,

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

neste cenário, a empresa labora apenas 4 dias seguidos em cada semana). Torna-se também importante analisar os tempos de embalagem – Figura 4.56.

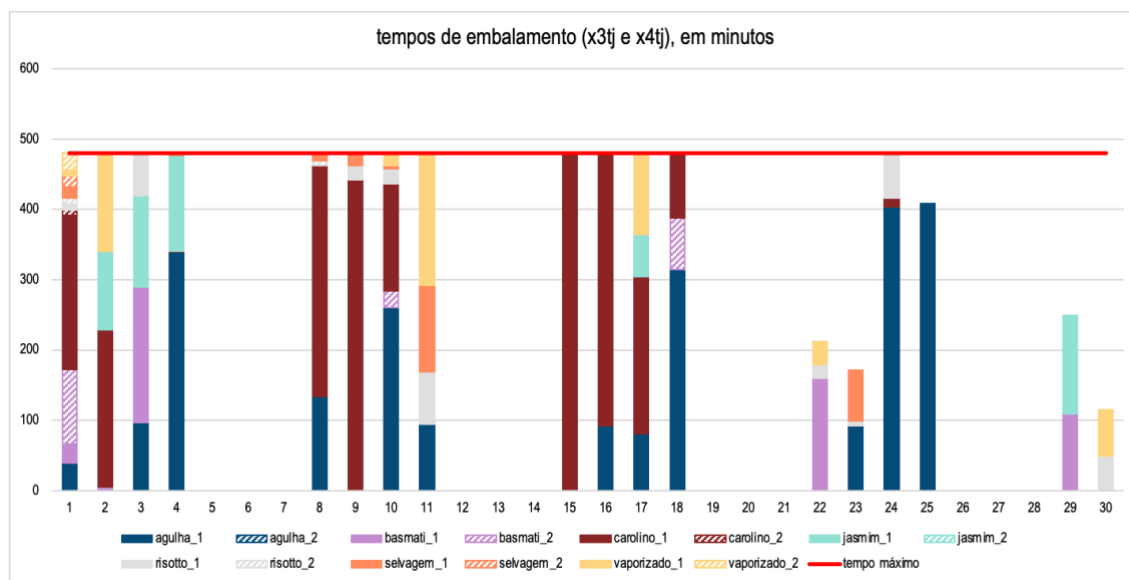


Figura 4.56 - Representação gráfica dos tempos de embalagem para os produtos em estudo, diferenciando se provem de para silo (x_{3ij} , visualmente a cheio) ou de *big-bags* (x_{4ij} , visualmente a tracejado), perante um cenário de diminuição de tempo de laboração semanal face ao cenário base da Formulação 2.

Perante a fase de embalagem, haveria também um aproveitamento quase total das horas disponíveis para laboração. Deste modo, para os valores de procura (d_{ij}) definidos, o aproveitamento funcional da maquinaria ocorreria em boas condições.

4.2.3.3 Cenário B3.3: Totalidade do dia e do mês (24/7)

O trabalho 24/7 ocorre ininterruptamente e é uma realidade em muitos setores, especialmente em serviços essenciais. Numa área empresarial, pode ser muito vantajoso devido tanto aos custos envolvidos de arranque fabril, bem como para responder a elevados valores de procura. Por outro lado, é o modelo mais desgastante para os funcionários, pois envolve o trabalho por turnos contínuos, causando desequilíbrios na vida pessoal, fadiga e exaustão.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

A Formulação 2 foi testada considerando a procura do cenário base (B1) – Cenário B3.3a.

O cenário descrito levou a uma resposta da função objetivo de 0.181. Em relação às três funções que integram, escalarizadas, a função objetivo (2.1), observa-se a não existência de incumprimentos de entregas, que são realizadas dezoito limpezas e que há preferência de produção para silos – 98.9 %.

As Figura 4.57 e Figura 4.58 mostram a distribuição dos tempos de processamento e embalagem, respetivamente, dos sete produtos em análise para um padrão temporal de vinte e quatro horas diárias, todos os dias do mês.

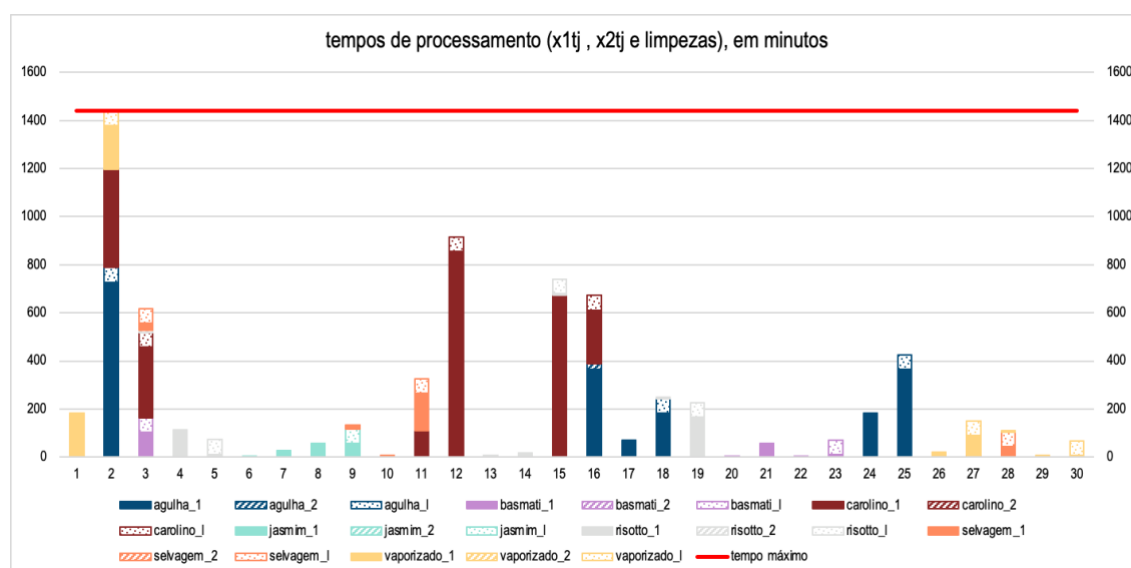


Figura 4.57 - Representação gráfica dos tempos de processamento para os produtos em estudo, diferenciando se segue para silo ($x1_{ij}$, visualmente a cheio) ou para *big-bags* ($x2_{ij}$, visualmente a tracejado), com os respetivos tempos de limpeza entre diferentes tipos de arroz, perante um cenário de aumento tempo de laboração face ao cenário base da Formulação 2.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

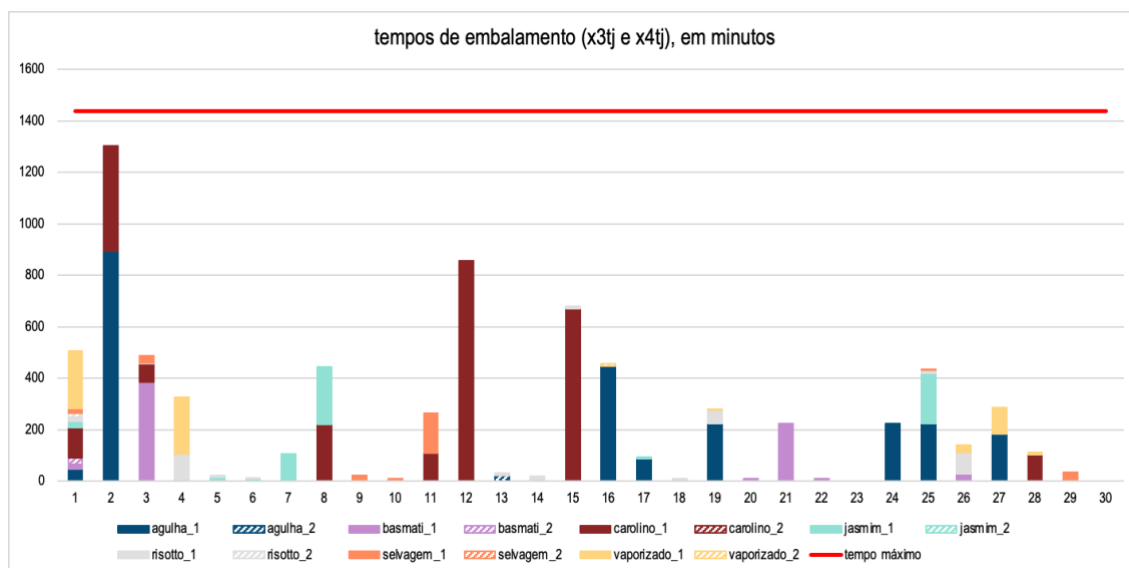


Figura 4.58 - Representação gráfica dos tempos de embalagem para os produtos em estudo, diferenciando se provem de para silo (x_{3ij} , visualmente a cheio) ou de *big-bags* (x_{4ij} , visualmente a tracejado), perante um cenário de aumento de tempo de laboração face ao cenário base da Formulação 2.

Como é observável pelas figuras anteriores, o teste com a totalidade de horas disponíveis deverá ganhar maior sentido apenas se houver aumento da procura. Para esse efeito, pretendendo testar a extensão do período de laboração proposto num cenário de maior procura, foram estabelecidos novos valores de procura, sendo quatro vezes os valores definidos no cenário base (B1).

O cenário descrito levou a uma resposta da função objetivo de 0.344. Em relação às três funções que integram, escalarizadas, a função objetivo (2.1), observa-se a não existência de incumprimentos de entregas, que são realizadas 33 limpezas e que há preferência de produção para silos – 96.2%.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

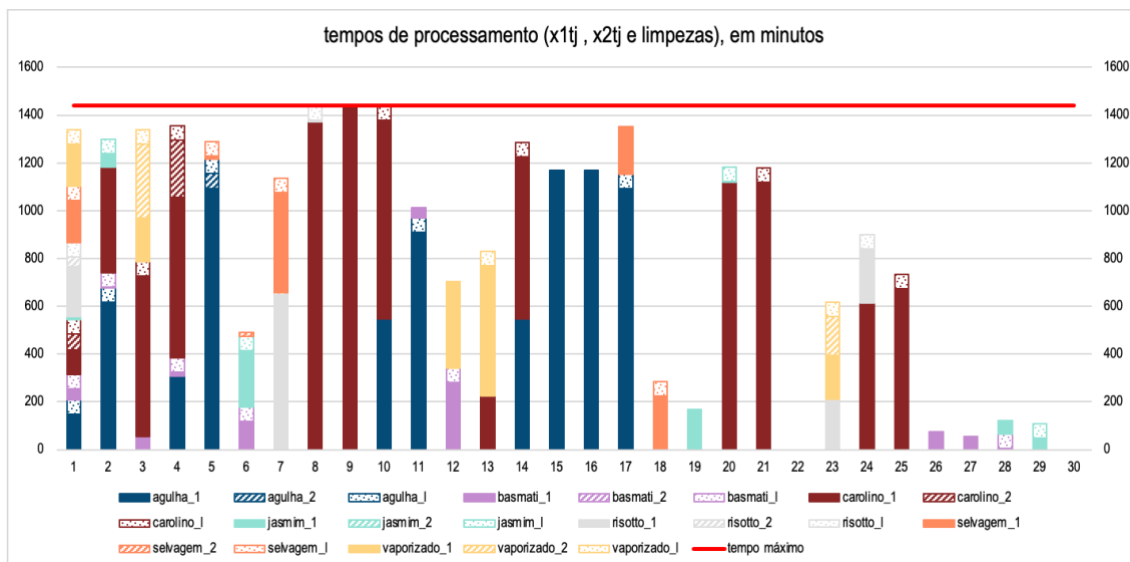


Figura 4.59 - Representação gráfica dos tempos de processamento para os produtos em estudo, diferenciando se segue para silo ($x1_{tj}$, visualmente a cheio) ou para *big-bags* ($x2_{tj}$, visualmente a tracejado), com os respetivos tempos de limpeza entre diferentes tipos de arroz, perante um cenário de aumento de tempo de laboração face ao cenário base da Formulação 2.

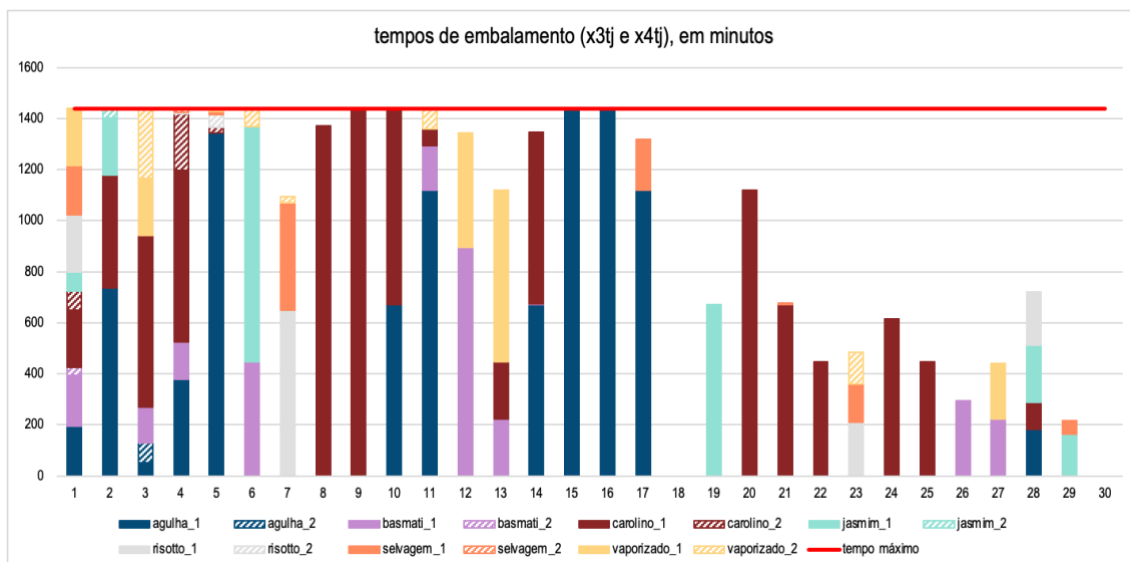


Figura 4.60 - Representação gráfica dos tempos de embalagem para os produtos em estudo, diferenciando se provem de para silo ($x3_{tj}$, visualmente a cheio) ou de *big-bags* ($x4_{tj}$, visualmente a tracejado), perante um cenário de aumento de tempo de laboração face ao cenário base da Formulação 2.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Comparação B1-B3

Antes do desenvolvimento da comparação face às horas de trabalho, é importante apresentar as informações relativas à resolução destes cenários. Essa informação é disponibilizada na Tabela 4.25.

Tabela 4.25 - Tabela resumo dos parâmetros do OpenSolver para cada cenário em estudo (B1 e B3) da Formulação 2.

	Cenário B1	Cenário B3.1	Cenário B3.2	Cenário B3.3a	Cenário B3.3b
<i>Resultado</i>	Por tempo limite	Por tempo limite	Por tempo limite	Por tempo limite	Por tempo limite
<i>Solução ótima</i>	0.192	0.160	0.173	0.180	0.344
<i>Valor da melhor solução admissível</i>	0.002	0.000	0.024	0.000	0.062
<i>Gap (%)</i>	90.86	9 883.81	6.12	Inf	4.53
<i>Número de nodos</i>	961	948	1 911	5 661	719
<i>Total de iterações</i>	282 261	241 958	222 829	206 498	174 715
<i>Tempo (CPU)</i>	150.19	150.06	150.27	150.09	150.28
<i>Tempo (Wallclock)</i>	178.62	177.98	175.90	183.60	167.41

Perante os cenários em comparação, é possível analisar alguns aspetos fulcrais ao problema. Assim, a Tabela 4.26 permite resumir as informações referentes à minimização da procura, limpezas e preferência por utilização de silos (z_2), a resposta da função objetivo (2.1), número total de limpezas realizadas (L_{total}) e a percentagem de utilização de silos face a *big-bags* (U_{silos}), respetivamente. Para a obtenção desses valores recorreu-se às equações (3.15) a (3.18), apresentadas anteriormente.

A tabela apresenta ainda valores relativos à taxa de variação percentual entre o cenário base e os cenários que se encontram a ser comparados nos parâmetros descritos. Estes valores são obtidos segundo as expressões (3.29) a (3.31) abaixo apresentadas, em que:

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

$$Gap_{11} = \begin{cases} \frac{z2_{B3.1} - z2_{B1}}{z2_{B1}} \times 100, \text{ entre B3.1 e B1} \\ \frac{z2_{B3.2} - z2_{B1}}{z2_{B1}} \times 100, \text{ entre B3.2 e B1} \\ \frac{z2_{B3.3a} - z2_{B1}}{z2_{B1}} \times 100, \text{ entre B3.3a e B1} \\ \frac{z2_{B3.3b} - z2_{B1}}{z2_{B1}} \times 100, \text{ entre B3.3b e B1} \end{cases} \quad (3.25)$$

$$Gap_{12} = \begin{cases} \frac{L_{total\ B3.1} - L_{total\ B1}}{L_{total\ B1}} \times 100, \text{ entre B3.1 e B1} \\ \frac{L_{total\ B3.2} - L_{total\ B1}}{L_{total\ B1}} \times 100, \text{ entre B3.2 e B1} \\ \frac{L_{total\ B3.3a} - L_{total\ B1}}{L_{total\ B1}} \times 100, \text{ entre B2.3a e B1} \\ \frac{L_{total\ B3.3b} - L_{total\ B1}}{L_{total\ B1}} \times 100, \text{ entre B2.3b e B1} \end{cases} \quad (3.26)$$

$$Gap_{13} = \begin{cases} \frac{U_{silos\ B3.1} - U_{silos\ B1}}{U_{silos\ B1}} \times 100, \text{ entre B3.1 e B1} \\ \frac{U_{silos\ B3.2} - U_{silos\ B1}}{U_{silos\ B1}} \times 100, \text{ entre B3.2 e B1} \\ \frac{U_{silos\ B3.3a} - U_{silos\ B1}}{U_{silos\ B1}} \times 100, \text{ entre B3.3a e B1} \\ \frac{U_{silos\ B3.3b} - U_{silos\ B1}}{U_{silos\ B1}} \times 100, \text{ entre B3.3b e B1} \end{cases} \quad (3.27)$$

Tabela 4.26 - Tabela resumo da resposta dos cenários em estudo (B1 e B3) da Formulação 2.

	$z2$		Número de limpezas		Utilização de silos	
		Gap_{11}	L_{total}	Gap_{12}	U_{silos}	Gap_{13}
Cenário B1	0.192		19		97.3%	
Cenário B3.1	0.160	-16.7%	16	-15.8%	99.6%	2.4%
Cenário B3.2	0.173	-10.0%	17	-10.5%	96.4%	-1.0%
Cenário B3.3a	0.180	-6.0%	18	-5.3%	98.9%	1.6%
Cenário B3.3b	0.344	78.7%	33	73.7%	96.2%	-1.2%

Nos cenários apresentados na tabela acima observa-se que com a redução do número de limpezas há uma melhor resposta ao problema, independente da redução ou aumento de tempo de laboração. Por sua vez, o Cenário B3.3b que teve um aumento da procura de quatro vezes mais face ao cenário base não teve um aumento do número de limpezas na mesma proporção. Uma das questões que se pode levantar é se, de forma a responder à procura, minimizando o número de limpezas, ocorreu um rearranjo da produção. Deste

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

modo, pode-se afirmar que houve um arranjo operacional que resultou num menor número de limpezas.

Sabe-se que as variações aplicadas nestes cenários são em função do tempo de laboração diário (tt). Para além deste parâmetro, existem ainda outros parâmetros que envolvem tempo, como o tempo total de processamento para silos e para *big-bags* ($c11_j$ e $c21_j$), o tempo de limpeza associado ao descasque (h_j) e o tempo de embalagem agrupamento e paletização de silos e de *big-bags* ($c12_j$ e $c22_j$).

A Tabela 4.27 apresenta os parâmetros temporais associados por fases do processo, permitindo assim analisar os tempos envolvidos. Assim, procurou-se saber o tempo total mensal disponível para laboração (TT), bem como os tempos de uso efetivo no descasque (TD) e no embalagem (TE), numa componente mensal, usando as equações de (3.28) a (3.30) para os cenários envolvidos – cenário base e cenários de variação de horas de trabalho:

$$TT = \sum_{t=1}^{30} tt \quad (3.28)$$

$$TD = \sum_{t=1}^{30} (\sum_{j=1}^7 c11_j \cdot x1_{tj} + \sum_{j=1}^7 c21_j \cdot x2_{tj} + \sum_{j=1}^7 h_j \cdot y2_{tj}) \quad (3.29)$$

$$TE = \sum_{t=1}^{30} (\sum_{j=1}^7 c12_j \cdot x3_{tj} + \sum_{j=1}^7 c22_j \cdot x4_{tj}) \quad (3.30)$$

Paralelamente, considerou-se fulcral relativizar esse tempo de uso efetivo nas duas áreas de laboração face ao tempo disponível. A expressão (3.31) é relativa à fase de descasque para os cinco cenários apresentados e a expressão (3.32) aplica-se relativamente à fase de embalagem:

$$Gap_{14} = \begin{cases} \frac{TT_{B1} - TD_{B1}}{TT_{B1}} \times 100, \text{ para B1} \\ \frac{TT_{B3.1} - TD_{B3.1}}{TT_{B3.1}} \times 100, \text{ para B3.1} \\ \frac{TT_{B3.2} - TD_{B3.2}}{TT_{B3.2}} \times 100, \text{ para B3.2} \\ \frac{TT_{B3.3a} - TD_{B3.3a}}{TT_{B3.3a}} \times 100, \text{ para B3.3a} \\ \frac{TT_{B3.3b} - TD_{B3.3b}}{TT_{B3.3b}} \times 100, \text{ para B3.3b} \end{cases} \quad (3.31)$$

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

$$Gap_{15} = \begin{cases} \frac{TT_{B1} - TE_{B1}}{TT_{B1}} \times 100, \text{ para B1} \\ \frac{TT_{B3.1} - TE_{B3.1}}{TT_{B3.1}} \times 100, \text{ para B3.1} \\ \frac{TT_{B3.2} - TE_{B3.2}}{TT_{B3.2}} \times 100, \text{ para B3.2} \\ \frac{TT_{B3.3a} - TE_{B3.3a}}{TT_{B3.3a}} \times 100, \text{ para B3.3a} \\ \frac{TT_{B3.3b} - TE_{B3.3b}}{TT_{B3.3b}} \times 100, \text{ para B3.3b} \end{cases} \quad (3.32)$$

Tabela 4.27 - Tabela resumo do tempo total dos cenários e dos tempos de operacionalidade no descasque e no embalamento para os cenários em estudo (B1 e B3).

	Tempo total	Tempo descasque	Tempo embalamento		
	TT	TD	Gap_14	TE	Gap_15
Cenário B1	10 560	7 247.0	68.6%	7 553.0	71.5%
Cenário B3.1	19 800	6 843.5	34.6%	7 392.0	37.3%
Cenário B3.2	8 640	6 903.5	79.9%	7 392.0	85.6%
Cenário B3.3a	43 200	6 970.0	16.1%	7 392.0	17.1%
Cenário B3.3b	43 200	25 513.9	59.1%	29 568.0	68.4%

Para todos os cenários, o tempo de embalamento é superior ao tempo de descasque. Isto deve-se ao facto do estado dos produtos. Relembrando a Tabela 4.15, o tempo de descasque associado a arroz em película é intermédio entre arroz em casca e arroz branqueado, sendo este último muito reduzido. Deste modo, quanto mais arroz no estado branqueado for necessário, menos tempo será necessário para obter uma tonelada de arroz. Por outro lado, o tempo de embalamento é igual para todos os tipos de arroz.

Analisando a percentagem de tempos usados quer no descasque, quer no embalamento, é possível verificar que o cenário que demonstra o melhor aproveitamento do tempo é o Cenário B3.2. Nesse cenário, ainda que envolvendo o nível de procura do nível base (B1), não foi atingida a utilização máximo do tempo disponível, é neste cenário, que apresenta um padrão de uma semana de quatro dias, que há o melhor proveito do tempo de máquinas.

É ainda importante analisar o Cenário B3.3b. Comparando-o com o cenário base, o tempo total também se revela de cerca de quatro vezes mais. Podia-se quase esperar que a

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

percentagem de tempos usados seriam semelhantes ao do cenário base, mas observa-se que há diferença. Um dos motivos de isto ocorrer é de se dar a conjugação do aproveitamento do tempo com a redução do número de limpezas, tal como se tinha apurado na Tabela 4.26.

4.2.4 Cenário B4: Ocorrência de Manutenção

Manter as máquinas em boas condições é vital para operações eficientes. Além de garantir a segurança dos funcionários, a manutenção regular prolonga a vida útil das máquinas, reduzindo custos a longo prazo e mantendo a qualidade do produto. Deste modo, outro ponto importante é verificar o cumprimento de entrega de produto ainda que com manutenção a ocorrer na fábrica. Assim, desenhou-se o cenário com uma semana de manutenção na terceira semana do mês em estudo, ocorrendo desfasadamente tanto no descasque como no embalamento.

4.2.4.1 Cenário B4.1: Ocorrência de Manutenção no Descasque

O primeiro cenário envolve a realização de manutenção no descasque. Assim, na Tabela 4.17, relativa à fase de descasque, no período relativo à terceira semana, ou seja, entre os dias 15 e 19, somente variável parâmetro de indicação de operacionalidade do descasque ($g1_{tj}$) tem valor 0. Tal como descrito previamente, a procura seguirá os valores descritos no cenário base (B1) e esperou-se que não ocorressem incumprimentos de entrega, em que a ação de descasque nas semanas anteriores se organizaria para responder à procura da terceira semana e que o processo de embalamento acontecesse sem restrições.

O cenário descrito levou a uma resposta da função objetivo de 0.212. Em relação às três funções que integram, escalarizadas, a função objetivo (2.1), observa-se a não existência de incumprimentos de entrega, que são realizadas vinte e uma limpezas e que há preferência de produção para silos – 98.0%.

A Figura 4.61 apresenta os tempos de processamento associados à fase de descasque.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

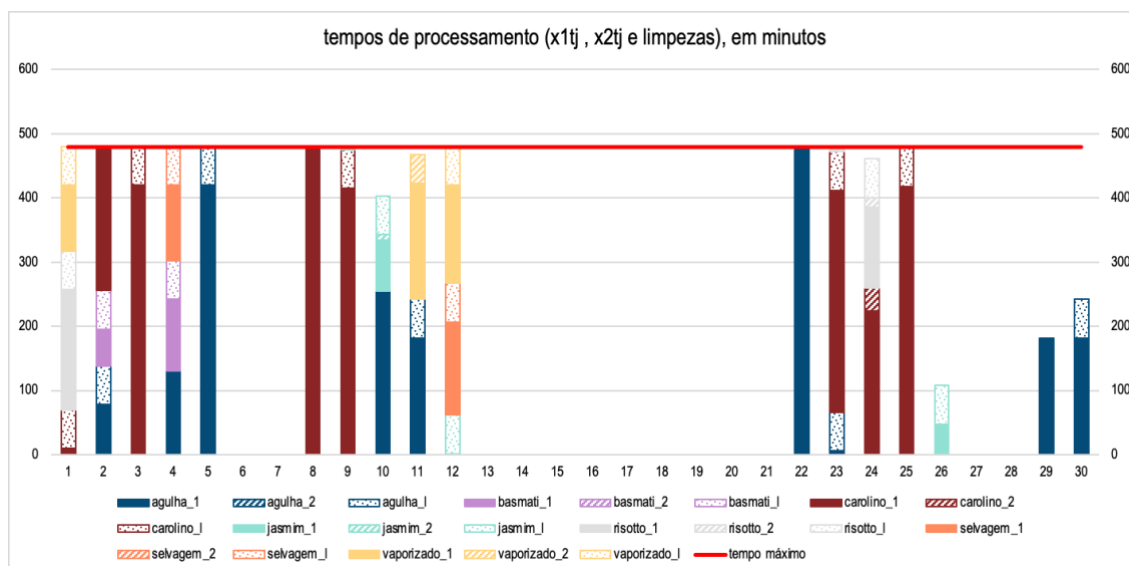


Figura 4.61 - Representação gráfica dos tempos de processamento para os produtos em estudo, diferenciando se segue para silo ($x1_{tj}$, visualmente a cheio) ou para *big-bags* ($x2_{tj}$, visualmente a tracejado), com os respetivos tempos de limpeza entre diferentes tipos de arroz, perante um cenário de manutenção no descasque na terceira semana face ao cenário base da Formulação 2.

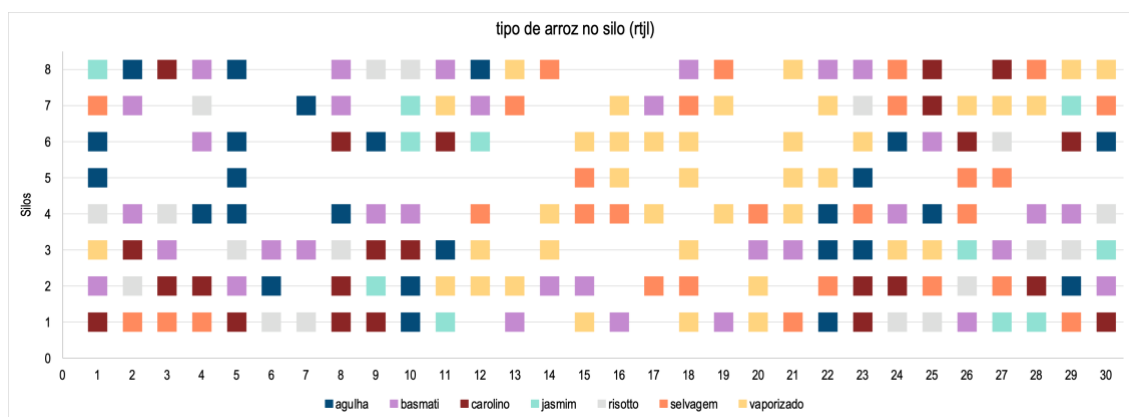


Figura 4.62 - Representação gráfica do uso dos silos no final do dia, face ao produto presente em cada, perante um cenário de manutenção no descasque na terceira semana face ao cenário base da Formulação 2.

Tal como se tinha previsto, nos dias 15 a 19, não ocorre descasque. Por outro lado, na Figura 4.62, pode-se observar que, nesse mesmo intervalo de tempo, os produtos existentes em silos são os mesmos.

Paralelamente, é importante analisar que atividade ocorre no embalamento, quer antes, quer durante este tempo - Figura 4.63.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

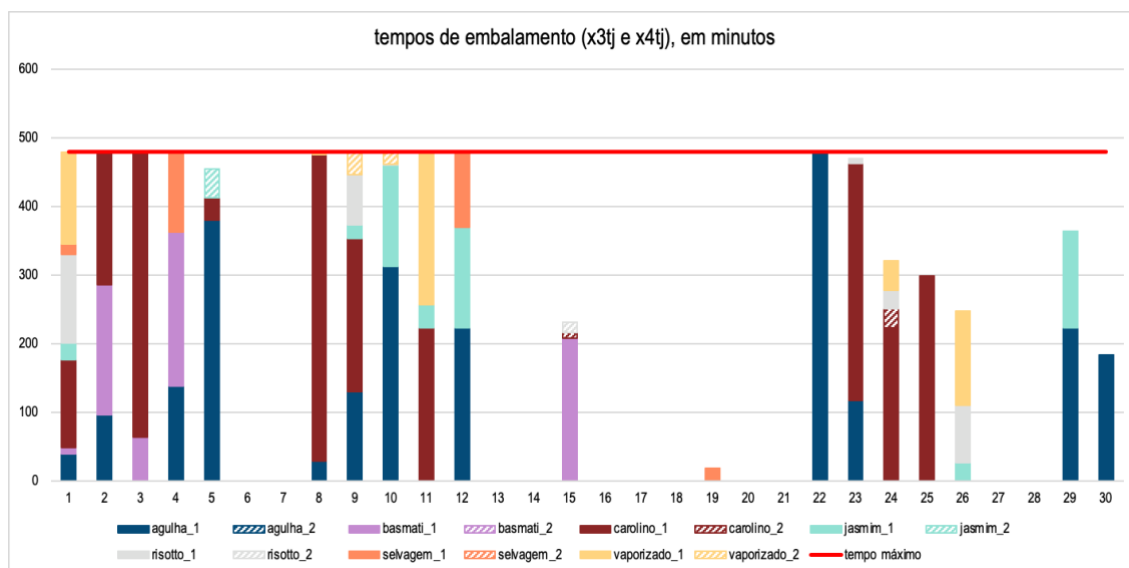


Figura 4.63 - Representação gráfica dos tempos de embalagem para os produtos em estudo, diferenciando se provem de para silo (x_{3ij} , visualmente a cheio) ou de *big-bags* (x_{4ij} , visualmente a tracejado), perante um cenário de manutenção no descasque na terceira semana face ao cenário base da Formulação 2.

Ao contrário do que seria esperado, durante a terceira semana, praticamente não ocorreu embalagem de produto e, por sua vez, nas duas semanas anteriores o tempo de embalagem foi maximizado. Assim, poderá acontecer que durante as duas semanas anteriores, houvesse embalagem para responder à procura da semana a decorrer e para responder à procura das semanas futuras. Esta informação pode ser confirmada pela análise do *stock* de arroz embalado durante o período em estudo - Figura 4.64.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

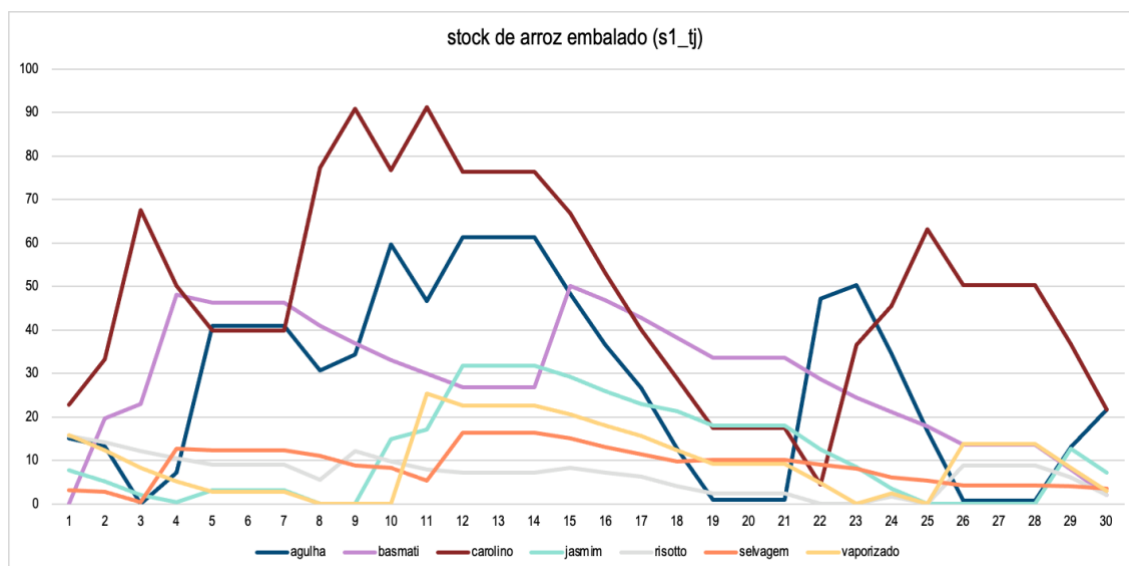


Figura 4.64 - Representação gráfica do *stock* de arroz embalado ($s1_{tj}$) perante um cenário de manutenção no descasque na terceira semana face ao cenário base da Formulação 2.

A Figura 4.64 permite corroborar que há maior volume de armazenamento antes da terceira semana, verificando-se uma diminuição de *stock* entre os dias 15 e 19.

4.2.4.2 Cenário B4.2: Ocorrência de Manutenção no Embalamento

O segundo cenário incide na existência de manutenção no embalamento. Assim, na Tabela 4.17, relativa à fase de descasque, no período relativo à terceira semana, ou seja, entre os dias 15 e 19, somente variável parâmetro de indicação de operacionalidade do embalamento ($g2_{tj}$) tem valor 0. Com a procura com valores descritos no cenário base (B1), esperou-se que não ocorressem incumprimentos, em que a ação de embalamento nas semanas anteriores seria suficiente para responder à procura da terceira semana e que o processo de descasque acontecesse sem restrições.

O cenário descrito levou a uma resposta da função objetivo de 0.225. Em relação às três funções que integram, escalarizadas, a função objetivo (2.1), que existem incumprimentos de entrega no valor de 0.06 toneladas (Figura 4.65), que são realizadas dezoito limpezas e que há preferência de produção para silos – 96.4%.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

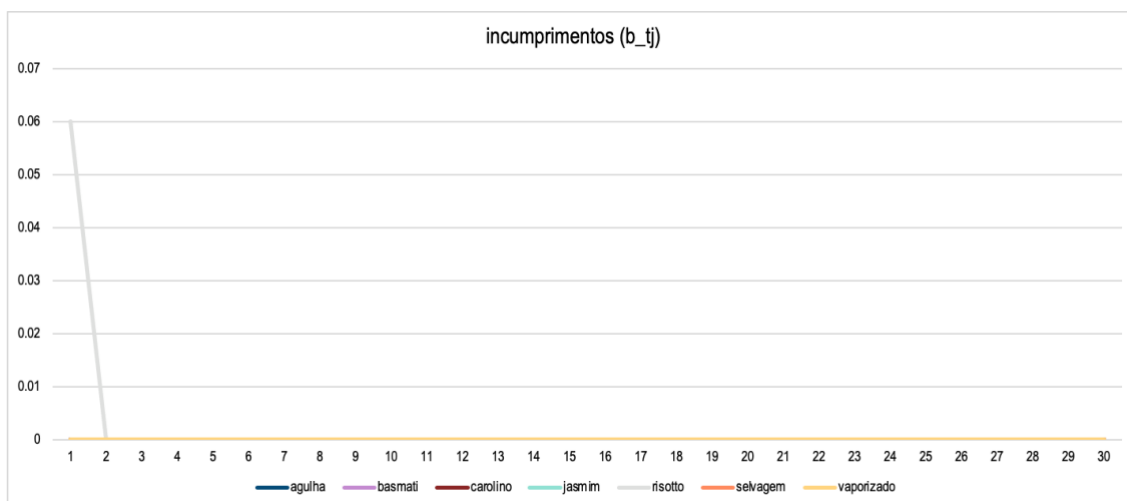


Figura 4.65 - Representação gráfica dos incumprimentos associados perante um cenário de manutenção no embalamento na terceira semana face ao cenário base da Formulação 2.

De forma contrária a todos os cenários apresentados no decorrer deste trabalho, perante um cenário de manutenção no embalamento, verificou-se a ocorrência de um incumprimento em Risotto no primeiro dia. Como nunca se verificaram incumprimentos nos outros cenários, será importante avaliar o porquê desta ocorrência, pois sempre houve *stock* para responder às necessidades.

Assim, pode-se analisar os tempos de processamento associados ao descasque (Figura 4.66) e ao embalamento (Figura 4.68), para compreender como ocorreu.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

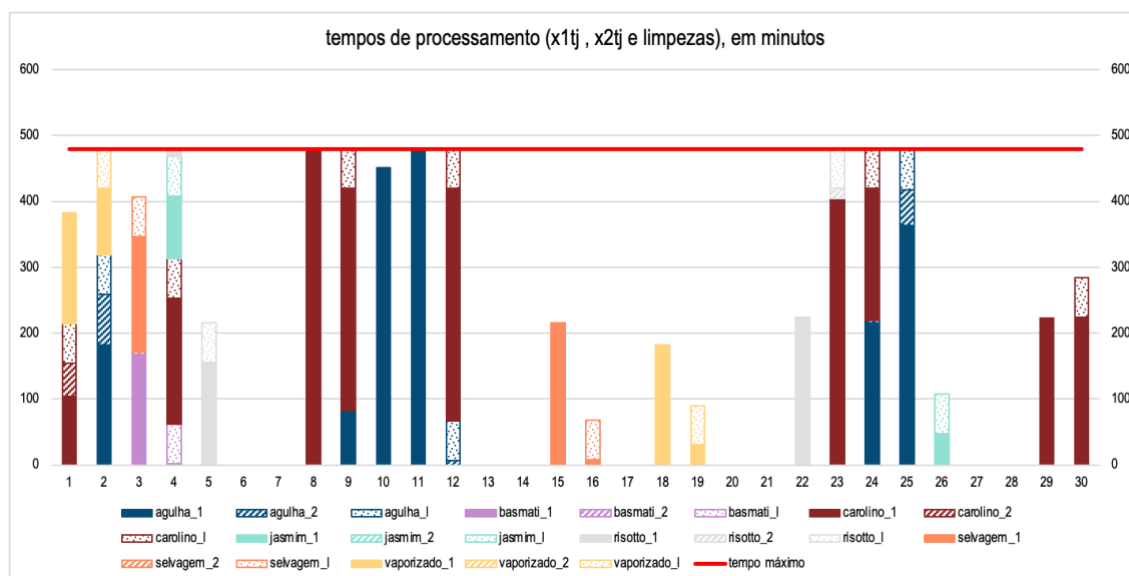


Figura 4.66 - Representação gráfica dos tempos de processamento para os produtos em estudo, diferenciando se segue para silo ($x1_{tj}$, visualmente a cheio) ou para *big-bags* ($x2_{tj}$, visualmente a tracejado), com os respetivos tempos de limpeza entre diferentes tipos de arroz, perante um cenário de manutenção no embalamento na terceira semana face ao cenário base da Formulação 2.

Neste cenário, ocorreu descasque durante a terceira semana representado pelas barras a cheio nos dias 15 a 19, sendo o produto armazenado em silos. Como será observável na Figura 4.67, do dia 14 para o dia 15 há Selvagem a surgir nos silos e do dia 17 para o dia 18 também há Vaporizado a ser armazenado em silos.

Em relação aos incumprimentos de entregas, é observável que no primeiro dia haveria tempo disponível no descasque para processar Risotto. Deste modo, não é a falta de tempo no descasque que causa consequência de falta de *stock*.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

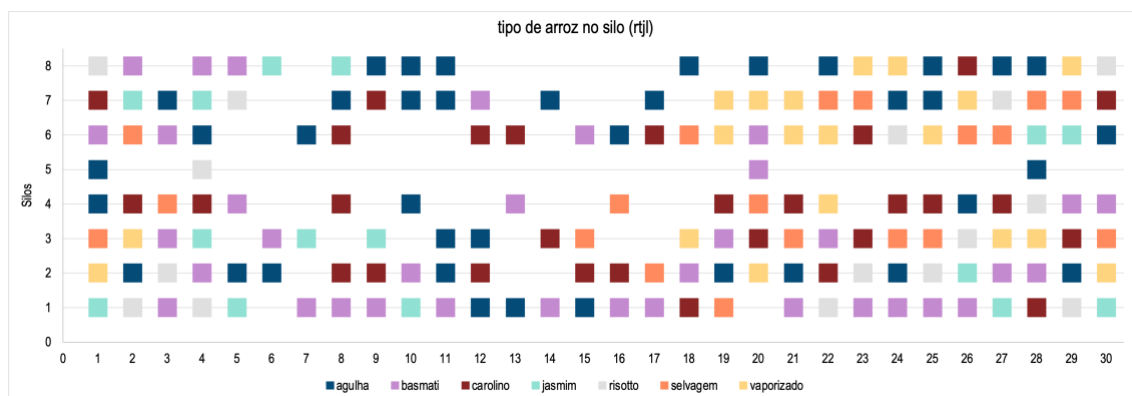


Figura 4.67 - Representação gráfica do uso dos silos no final do dia, face ao produto presente em cada, perante um cenário de manutenção no embalamento na terceira semana face ao cenário base da Formulação 2.

Tendo-se verificado que não era falha de produto por causa do descasque, deve-se analisar os tempos de embalamento - Figura 4.68

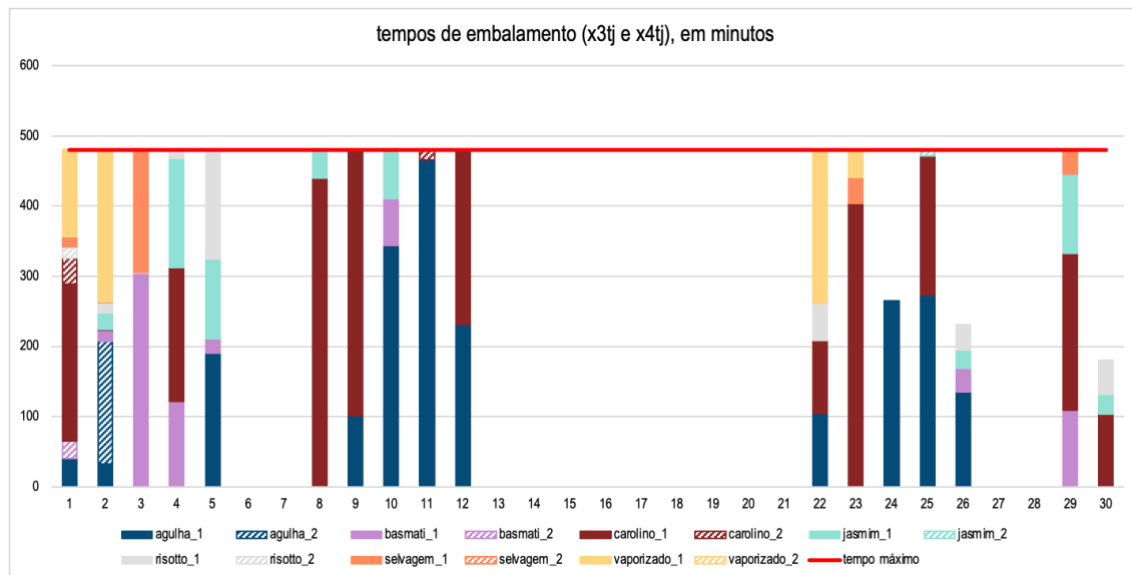


Figura 4.68 - Representação gráfica dos tempos de embalamento para os produtos em estudo, diferenciando se provem de para silo (x_{3ij} , visualmente a cheio) ou de *big-bags* (x_{4ij} , visualmente a tracejado), perante um cenário de manutenção no embalamento na terceira semana face ao cenário base da Formulação 2.

No embalamento, verifica-se um aproveitamento total do tempo nas duas primeiras semanas. A ausência de tempo livre justifica o incumprimento que ocorre, mas é um tanto

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

ao quanto estranho que o incumprimento se tenha dado no primeiro dia, quando se verifica que no Cenário B1 não ocorreu nada semelhante. O que se torna então provável é que o incumprimento poderia ocorrer em qualquer um dos dias, sendo a resposta de se dar incumprimento de Risotto no dia 1 uma das possíveis. Uma outra justificação pode estar encerrada no Gap de dualidade (17.05%). Esta solução apresenta um Gap de dualidade que pode englobar um erro da solução apresentada relativamente à solução ótima do problema.

Comparação B1-B4

Iniciando pela apresentação das informações relativas à resolução destes cenários, os parâmetros fornecidos pelo OpenSolver encontram-se na Tabela 4.28.

Tabela 4.28 - Tabela resumo dos parâmetros do OpenSolver para cada cenário em estudo (B1 e B4) da Formulação 2.

	Cenário B1	Cenário B4.1	Cenário B4.2
Resultado	Por tempo limite	Por tempo limite	Por tempo limite
Solução ótima	0.192	0.211	0.225
Valor da melhor solução admissível	0.002	0.019	0.012
Gap (%)	90.86	9.88	17.05
Número de nodos	961	1 956	670
Total de iterações	282 261	231 825	232 337
Tempo (CPU)	150.19	150.43	150.28
Tempo (Wallclock)	178.62	173.96	229.55

Para além da informação recolhida no final da execução do OpenSolver, é importante analisar alguns aspetos fulcrais do problema. Assim, a Tabela 4.29 permite resumir as informações referentes à minimização da procura, limpezas e preferência por utilização de silos (z_2), à resposta da função objetivo (2.1), número de limpezas realizadas (L_{total}) e a percentagem de utilização de silos face a *big-bags* (U_{silos}). Estes valores foram obtidos

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

com recurso às (3.15) a (3.18) previamente descritas e tendo em conta os dados específicos dos cenários. Os valores de taxa de variação percentual entre o cenário base e os cenários em análise foram obtidos com recurso às expressões (3.33) a (3.35) abaixo apresentadas:

$$Gap_{16} = \begin{cases} \frac{z2_{B4.1} - z2_{B1}}{z2_{B1}} \times 100, \text{entre B4.1 e B1} \\ \frac{z2_{B4.2} - z2_{B1}}{z2_{B1}} \times 100, \text{entre B4.2 e B1} \end{cases} \quad (3.33)$$

$$Gap_{17} = \begin{cases} \frac{L_{total\ B4.1} - L_{total\ B1}}{L_{total\ B1}} \times 100, \text{entre B4.1 e B1} \\ \frac{L_{total\ B4.2} - L_{total\ B1}}{L_{total\ B1}} \times 100, \text{entre B4.2 e B1} \end{cases} \quad (3.34)$$

$$Gap_{18} = \begin{cases} \frac{U_{silos\ B4.1} - U_{silos\ B1}}{U_{silos\ B1}} \times 100, \text{entre B4.1 e B1} \\ \frac{U_{silos\ B4.2} - U_{silos\ B1}}{U_{silos\ B1}} \times 100, \text{entre B4.2 e B1} \end{cases} \quad (3.35)$$

Tabela 4.29 - Tabela resumo da resposta dos cenários em estudo (B1 e B4) da Formulação 2.

	$z2$	Gap_{16}	Número de limpezas L_{total}	Gap_{17}	Utilização de silos U_{silos}	Gap_{18}
Cenário B1	0.192		19		97.3%	
Cenário B4.1	0.211	10.0%	21	10.5%	98.0%	0.7%
Cenário B4.2	0.225	17.1%	18	-5.3%	96.4%	-1.0%

Como se verificou anteriormente, o cenário B4.2 tem ainda a informação importante de ter ocorrido incumprimento, no valor de 0.06 ton. Dado que este valor não tinha comparação possível com os restantes cenários, não se apresenta na tabela acima. Ainda assim, é importante verificar que há um menor número de limpezas neste cenário. Uma das consequências de ocorrer incumprimentos é originar que não haja a produção de um determinado produto. Por sua vez, o facto de não se dar a produção também implica que não haja a troca de produto no descasque, o que pode responder ao facto deste cenário também ter um menor número de limpezas.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Nestes cenários há dois tempos específicos para as duas áreas de operação. Deste modo, tornou-se necessário saber o tempo total mensal disponível para laboração (TT), bem como os tempos de uso efetivo no descasque (TD) e no embalamento (TE). Para tal e tendo em consideração os dias de inoperacionalidade, foram usadas as equações de (3.28) a (3.30) descritas previamente. Por sua vez, os cálculos relativos à taxa de laboração seguem as expressões (3.36) e (3.37).

Na Tabela 4.30, apresenta-se os valores totais de tempo por secção e qual o tempo usado.

$$Gap_{19} = \begin{cases} \frac{TT_{B1} - TD_{B1}}{TT_{B1}} \times 100, \text{ para B1} \\ \frac{TT_{B4.1} - TD_{B4.1}}{TT_{B4.1}} \times 100, \text{ para B4.1} \\ \frac{TT_{B4.2} - TD_{B4.2}}{TT_{B4.2}} \times 100, \text{ para B4.2} \end{cases} \quad (3.36)$$

$$Gap_{20} = \begin{cases} \frac{TT_{B1} - TE_{B1}}{TT_{B1}} \times 100, \text{ para B1} \\ \frac{TT_{B4.1} - TE_{B4.1}}{TT_{B4.1}} \times 100, \text{ para B4.1} \\ \frac{TT_{B4.2} - TE_{B4.2}}{TT_{B4.2}} \times 100, \text{ para B4.2} \end{cases} \quad (3.37)$$

Tabela 4.30 - Tabela resumo do tempo total dos cenários e dos tempos de operacionalidade no descasque e no embalamento para os cenários em estudo (B1 e B4).

	Descasque			Embalamento		
	Tempo total	Tempo usado	Gap ₁₉	Tempo total	Tempo usado	Gap ₂₀
Cenário B1	10560	7247.0	68.6%	10560	7553.0	71.5%
Cenário B4.1	8160	7143.5	87.5%	10560	7392.0	70.0%
Cenário B4.2	10560	7171.0	67.9%	8160	7391.5	90.6%

Na tabela, os valores a sombreado são referentes à operação que está a ter a ação de manutenção. Como é visível, a redução de tempo originou um aproveitamento do tempo na sua quase totalidade face à procura considerada.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Como foi observável no decorrer do presente trabalho, este encontra-se dividido de acordo com as duas formulações que foram estabelecidas. Assim, também este capítulo será desta forma apresentado.

5.1 Formulação 1

Primeiramente, torna-se importante relembrar a questão que foi colocada:

Q1: “Qual o melhor planeamento de compras de forma a não haver roturas de *stock*, cumprindo com os requisitos logísticos do sistema produtivo?”

Para responder a esta questão, propôs-se a Formulação 1, que procura responder ao processo de planeamento de compras de matéria-prima, minimizando o custo total de aquisição. A formulação garante que produto em armazém respeita uma quantidade mínima pré-definida e respeita um valor monetário máximo mensal disponível.

Perante os três cenários desenvolvidos, as soluções não apresentaram falhas no abastecimento de arroz. Em termos comparativos, considerando situações empresariais reais e num horizonte de planeamento anual, a não ocorrência de falhas de abastecimento é relativamente incerta. Porém, o uso de uma ferramenta de planeamento de compras permitirá tomar as melhores decisões, preservando o objetivo da minimização de custos. Embora a formulação só se tenha focado na compra de matéria-prima, haveria outros fatores que poderiam entrar no sistema. Por exemplo, poderia ser adicionada a gestão de fornecedores, considerando uma escolha entre vários. Por outro lado, poderia ser considerada a previsão de receitas e despesas como outro parâmetro a ser acrescentado.

5.2 Formulação 2

À segunda formulação estava associada a seguinte questão:

Q2: “Qual o melhor planeamento produtivo de forma a minimizar as perdas de negócio, garantindo que não há rotura de *stock*, reduzindo as mudanças de tipo de produto e cumprindo com os requisitos operacionais do sistema produtivo?”

Logo, a Formulação 2 traduz, de forma matemática, o planeamento de produção na transformação e embalamento no caso em estudo. Entre todos os cenários analisados, apenas num (cenário B4.2) não se verificou o cumprimento da procura. Esta formulação foi utilizada para analisar diversos cenários, nomeadamente, cenários envolvendo variações na procura, variações no tempo total de laboração diário e variações na operacionalidade do descasque e do embalamento. Para este planeamento de produção compreendeu-se apenas a transformação de arroz em granel para produto finalizado embalado, mas poderia ter relacionado outras áreas como a gestão de armazenagem de material subsidiário.

5.3 Principais Contributos

A análise e a discussão dos vários cenários apresentados permitem estabelecer estratégias nas áreas de planeamento de compras, planeamento financeiro e planeamento de produção. Estas análises mostraram a importância da integração dessas componentes na eficiência operacional de uma empresa.

Após o desenvolvimento, teste e análise de ambas as formulações, compreende-se que a área de planeamento é fundamental para assegurar a continuidade das operações produtivas e, independentemente da área, a programação detalhada das atividades de produção garante as existências de produto, a utilização otimizada dos recursos disponíveis e a minimização de desperdícios. Assim, o mais importante é a coordenação entre a produção, a procura do mercado e a gestão de *stocks*.

Observando-se as duas formulações, tendo sido mostrado no capítulo anterior, as soluções fornecem informação relativa à especificidade do processo. Considerando a Formulação

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

1, para além de se definir as quantidades a comprar, estão referenciados os tempos de entrada de produto em armazém e qual o custo que está envolvido na compra. Estes dois pontos conseguem auxiliar no processo de logística, permitindo coordenar os espaços disponíveis para a matéria-prima recebida e o pagamento em causa.

Por sua vez, na Formulação 2, a quantidade de informação disponível é muito superior e permite colaborar no processo de tomada de decisão, podendo-se referir o auxílio que presta na definição do tempo envolvido nos processos de descasque e embalamento. Embora não se tenha verificado extensamente, dado que só ocorreu incumprimento num dos cenários (cenário B4.2), a utilização da formulação permitirá sugerir qual entrega que não será cumprida, tendo em conta todas as condicionantes do sistema, ao longo de todo o horizonte de planeamento.

Refira-se que, embora as formulações desenvolvidas não se apresentem integradas, a coordenação entre o planeamento de compras e de produção é vital para as operações internas, promovendo uma maior sinergia entre os departamentos e assegurando que os objetivos estratégicos da empresa se encontram alinhados. O recurso a ferramentas, como as formulações desenvolvidas, apresenta-se como passo determinante para uma gestão avançada e a adoção de práticas de melhoria contínua, que impulsionará a competitividade no mercado.

5.4 Trabalho Futuro

Para este trabalho há duas vertentes que se projetam no futuro, nomeadamente: a aplicabilidade em meio empresarial e a evolução que poderá trazer; e o desenvolvimento em meio académico que enriquecerá o meio empresarial.

A nível empresarial, a aplicabilidade das formulações desenvolvidas redefiniria de forma quase imediata determinados parâmetros no trabalho. Com o planeamento mensal surgiria uma automação de processos, resultando em maior eficiência e redução de custos. Também haveria impacto na vertente de sustentabilidade, em que a pegada ecológica seria reduzida, pela redução de gastos em eletricidade no arranque fabril.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Acresce que é ainda possível continuar com um processo de melhoria também nas formulações. Um ponto interessante a ser desenvolvido era a ordenação da resposta das fases a decorrer quer no descasque, quer no embalamento, com recurso a código em linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA).

A incorporação das necessidades de outros materiais para se chegar ao produto embalado é um dos pontos que se revela interessante, pois coordenaria também o *stock* de outros materiais que indiretamente influenciam a cadeia de abastecimento. A capacidade de decisão perante vários fornecedores, quer de matéria-prima, quer de material subsidiário, revela-se como um desenvolvimento estimulante, porque daria uma escolha isenta em que o foco estaria no custo e no tempo de entrega. Também a adição da informação de procura por encomenda, sabendo que esta não será produto único, mas com várias referencias, era uma inovação que iria enriquecer e auxiliar na tomada de decisão quando se verificasse que teria de ocorrer incumprimento.

Recordando o ano 2020, a procura de bens essenciais atingiu números nunca vistos. O recurso a estas ferramentas matemáticas permitiria aumentar a capacidade de resposta e resiliência em situações semelhantes.

Por outro lado, este trabalho pode desviar-se da área de planeamento e ser valorizado com um mecanismo de reconhecimento do padrão de procura baseado no passado. Embora pudesse mudar o foco do trabalho, outro ponto interessante de investigação seria analisar as diferentes áreas do processo e realizar o escalonamento de pessoal e a definição de turnos aquando do aumento da procura.

Em suma, o desenvolvimento tido neste trabalho irá sempre trazer benefícios uma empresa, na medida em que irá melhorar a tomada de decisões e otimizar a eficiência operacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amorim, P., Antunes, C. H., & Almada-Lobo, B. (2011). Multi-objective lot-sizing and scheduling dealing with perishability issues. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50(6), 3371–3381. <https://doi.org/10.1021/ie101645h>
- Beemsterboer, B., Land, M., & Teunter, R. (2017). Flexible lot sizing in hybrid make-to-order/make-to-stock production planning. *European Journal of Operational Research*, 260(3), 1014–1023. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.01.015>
- Behzadi, G., O’Sullivan, M. J., Olsen, T. L., & Zhang, A. (2018). Agribusiness supply chain risk management: A review of quantitative decision models. *Omega*, 79, 21–42. <https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2017.07.005>
- Bian, Y., Lemoine, D., Yeung, T. G., Bostel, N., Hovelaque, V., Viviani, J. laurent, & Gayraud, F. (2018). A dynamic lot-sizing-based profit maximization discounted cash flow model considering working capital requirement financing cost with infinite production capacity. *International Journal of Production Economics*, 196, 319–332. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2017.12.002>
- Chen, S., Berretta, R., Clark, A., & Moscato, P. (2019). Lot Sizing and Scheduling for Perishable Food Products: A Review. *Reference Module in Food Science*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21444-3>
- Cristino, M. (2023). *Comunicação Informal - Entrevista*.
- Cunha, A. L., Santos, M. O., Morabito, R., & Barbosa-Póvoa, A. (2018). An integrated approach for production lot sizing and raw material purchasing. *European Journal of Operational Research*, 269(3), 923–938. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2018.02.042>
- Decreto-Lei n.º 157/2017 do Ministério da Agricultura, Florestas e Desenvolvimento Rural. (2017). In *Diário da República, I Série - Número 248*.
- Ernesto Morgado SA. (2012). *Fotografia de Arroz*.
- Ernesto Morgado SA. (2013). *Fotografia de Diferentes Estados de Arroz*.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *Crops and livestock products - Statistic Database*. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Golrizgashti, S., Hosseini, S. H., Zhu, Q., & Sarkis, J. (2023). Evaluating supply chain dynamics in the presence of product deletion. *International Journal of Production Economics*, 255, 108722. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2022.108722>
- Joint FAO/WHO. (1992). Codex Alimentarius Commission. In *Food and Agriculture Organization of the United Nations : World Health Organization*.
- Lezírias Ribatejanas. (2018). *Os diferentes tipos de arroz*. Município de Benavente. <https://arrozcarolino.pt/2018/05/05/os-diferentes-tipos-de-arroz/>
- Lim, J. S., Abdul Manan, Z., Hashim, H., & Wan Alwi, S. R. (2013). Optimal multi-site resource allocation and utility planning for integrated rice mill complex. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(10), 3816–3831. https://doi.org/10.1021/IE302884T/SUPPL_FILE/IE302884T_SI_002.PDF
- Maiyar, L. M., & Thakkar, J. J. (2019). Modelling and analysis of intermodal food grain transportation under hub disruption towards sustainability. *International Journal of Production Economics*, 217, 281–297. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2018.07.021>
- Mason, A. J. (2012). *OpenSolver - An Open Source Add-in to Solve Linear and Integer Programmes in Excel*. 401–406. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29210-1_64
- Md Mashud, A. H., Roy, D., Daryanto, Y., Mishra, U., & Tseng, M. L. (2022). Sustainable production lot sizing problem: A sensitivity analysis on controlling carbon emissions through green investment. *Computers & Industrial Engineering*, 169, 108143. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2022.108143>
- Pais, J. M. (2019). *Fotografia de Campo de Arroz da Área de Maiorca, Figueira da Foz*.
- Rajib, P. (2015). Indian agricultural commodity derivatives market – In conversation with S Sivakumar, Divisional Chief Executive, Agri Business Division, ITC Ltd. *IIMB Management Review*, 27(2), 118–128. <https://doi.org/10.1016/J.IIMB.2015.02.002>
- Roxo, A. (2024). *Comunicação Informal - Entrevista*.

O Caminho do Arroz: um Modelo de Otimização do Processo

Sociedade Portuguesa de Inovação, & Associação Nacional dos Industriais de Arroz. (1999). *Análise do Sector Agro-Alimentar do Arroz em Portugal e Levantamento dos Principais Tendências de Evolução*.

Unilever Food Solutions Portugal. (2023). *Descubra os Diversos Tipos de Arroz que Existem no Mercado*. <https://www.unileverfoodsolutions.pt/Inspiracao/tecnicas-de-corte/arrozes/tipos-de-arroz.html>

Zhang, G., Nishi, T., Turner, S. D. O., Oga, K., & Li, X. (2017). An integrated strategy for a production planning and warehouse layout problem: Modeling and solution approaches. *Omega*, 68, 85–94. <https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2016.06.005>