



M 2014

U. PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA O PLANEAMENTO DA PRODUÇÃO

CÉSAR DUARTE DIAS DA SILVA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA INDUSTRIAL E GESTÃO

**Desenvolvimento de um Sistema de Apoio à Decisão para o
Planeamento da Produção**

César Duarte Dias da Silva

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Manuel Pina Marques



FEUP

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Industrial e Gestão**

2014-07-15

Aos meus Avós, Pais e Irmão

Resumo

Embora as organizações possuam geralmente mecanismos automatizados destinados à calendarização das operações, verifica-se em alguns casos que aqueles não traduzem a realidade da produção. Os calendários gerados, para além de serem inadequados, chegam a ser inexecutáveis, dado não verificarem as restrições tecnológicas que o processo impõe.

Neste projeto, realizado em ambiente empresarial, foi estudado o problema de planeamento das operações produtivas de uma empresa industrial. O contexto produtivo em análise, um ambiente *job shop*, é um dos mais complexos e de difícil resolução.

A calendarização manual das diversas operações produtivas, além de ser bastante difícil e demorada, não facilita a comparação entre calendários alternativos, a aplicação de diferentes critérios de prioridade e o cálculo de avaliadores de desempenho. Quando se opta por este tipo de abordagem, a elevada complexidade inerente aos processos produtivos força à utilização de regras simples e de reduzido esforço de cálculo numérico.

No contexto produtivo analisado durante este projeto, o planeamento das operações é feito de forma essencialmente manual. Apesar de existir um sistema de informação com um módulo de planeamento, os calendários são gerados sem o seu suporte. Dadas as circunstâncias, e com o objetivo de flexibilizar e automatizar o processo de planeamento, foi desenvolvido um sistema de apoio à decisão capacitado para tempos de *setup* dependentes da sequência de operações.

Apesar de ser definido um modelo de programação linear para o planeamento das operações, a obtenção de soluções ótimas para esse modelo exigiria a utilização de um *software* comercial de otimização específico de elevado custo. Por esse motivo foram implementados numa folha de cálculo modelos heurísticos baseados em regras de prioridade.

A codificação desses modelos, e posterior integração numa interface assente em folhas de cálculo, levou à criação de um sistema de apoio à decisão. Este permite a geração de calendários de fabrico executáveis através de diversos critérios de prioridade e a sua avaliação de desempenho. Verificou-se, após a realização de testes computacionais, que o sistema permite gerar os calendários pretendidos de forma intuitiva e em poucos segundos.

Development of a decision support system for the production planning

Abstract

Although organizations have often automated mechanisms for the operations scheduling sometimes, these systems doesn't express the production reality. The schedules generated by these, besides being inappropriate, can be infeasible, due to breach of technological constraints that the process requires.

In this project, realized in a business environment, the productive operations scheduling problem of an industrial company was studied. The productive context analysed, a job shop environment, it's one of the most complex and difficult to solve.

The operations scheduling handmade, in addition to being very difficult and time consuming, doesn't facilitate the comparison of alternative schedules, the application of different priority criterions and the calculation of performance evaluators. When this approach is used, the high complexity inherent to production processes forces the use of simple rules and not involving a huge numeric calculation effort.

In the productive context analysed during this project, the operations scheduling is essentially handmade. Despite existence of an information system with a production planning module, the schedules are generated without this support. Given the circumstances, and in order to increase the flexibility and automate the planning process, a decision support system able to consider sequence-dependent setup times was developed.

Although has been defined a linear programming model for the operations scheduling, finding optimal solutions would require the use of optimization software with high cost. For this reason, heuristic models based on priority rules were implemented in a spreadsheet.

The encoding of heuristic model, and subsequent integration of a spreadsheet-based interface, led to the development of the desired decision support system. This allows the generation of feasible production schedules through various priority criteria and their performance evaluation. It was found, after performing computational tests, that this system allows the achievement of desired production schedules intuitively and in few seconds.

Agradecimentos

A toda a minha família que me apoiou neste percurso e que depositou a sua confiança em mim, em particular os meus pais, que me apoiaram e proporcionaram a realização do curso superior.

Ao professor Pina Marques, pela colaboração, disponibilidade e conhecimentos transmitidos no decurso da realização deste projeto.

À empresa onde o projeto teve lugar, a Kristaltek – Laser e Mecânica de Precisão, Lda., pela oportunidade concedida.

A todos os meus amigos e colegas que me acompanharam nas diversas etapas da minha vida.

Índice de conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Apresentação da KTK	2
1.2	Processo produtivo da KTK.....	3
1.3	Posicionamento do projeto na atividade da KTK.....	5
1.4	Temas abordados e sua organização	6
2	Revisão da literatura	7
2.1	Pressupostos	7
2.2	Tempos de <i>setup</i>	8
2.3	Medidas de desempenho	8
2.4	Classificação e representação gráfica	10
2.5	Complexidade	12
2.6	Abordagens de resolução	13
2.6.1	Modelos de solução ótima	13
2.6.2	Modelos de aproximação.....	14
2.6.3	Análise crítica	17
3	Descrição do problema	19
3.1	Ordens de fabrico.....	20
3.2	Tempos de <i>setup</i>	21
3.3	Criação dos calendários.....	22
3.4	Avaliação do desempenho	26
4	Modelos propostos	27
4.1	Nomenclatura e parâmetros.....	27
4.2	Modelo matemático de programação linear	28
4.2.1	Variáveis de decisão.....	28
4.2.2	Função objetivo	30
4.2.3	Restrições.....	30
4.3	Consecutividade de eventos de planeamento.....	32
4.4	Modelo heurístico	33
4.4.1	Nomenclatura	34
4.4.2	Algoritmo de sequenciamento de operações.....	36
4.4.3	Método de seleção da próxima operação.....	39
4.4.4	Algoritmo de calendarização de operações	41
4.4.5	Cálculo de avaliadores de desempenho.....	43
5	Sistema de apoio à decisão desenvolvido	45
5.1	Interface e modo de funcionamento.....	45
5.2	Testes computacionais.....	49
6	Conclusões e perspetivas de trabalho futuro.....	51
	Referências	55
	ANEXO A: problema P1	59
	ANEXO B: problema P2	63
	ANEXO C: problema P3.....	67

ANEXO D: problema P4 71

Glossário

ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i> (sistema integrado de gestão empresarial).
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
<i>Job Shop</i>	Formato de <i>layout</i> onde os equipamentos estão agrupados por similaridade.
JSSP	<i>Job Shop Scheduling Problem</i> (problema de calendarização em <i>job shop</i>).
KTK	Forma abreviada de designar Kristaltek – Laser e Mecânica de Precisão, Lda..
<i>Scheduling</i>	Processo de calendarização de operações.
<i>Setup</i>	Preparação de equipamento para o processamento de determinada operação.

Índice de figuras

Figura 1 – Missão, visão e compromissos da empresa	2
Figura 2 – Etapas do processo produtivo da empresa	3
Figura 3 – Representação da operação de maquinação de peças	4
Figura 4 – Representação do carácter cíclico da etapa de maquinação.....	4
Figura 5 – Oportunidades de melhoria no processo de planeamento da produção	6
Figura 6 – Grafo disjuntivo para um problema $3/3/G/W_{max}$	10
Figura 7 – Grafo disjuntivo acíclico para um problema $3/3/G/W_{max}$	11
Figura 8 – Diagrama de Gantt para um problema $3/3/G/W_{max}$	11
Figura 9 – Classes de complexidade	12
Figura 10 – Modelos de solução ótima	13
Figura 11 – Modelos de aproximação.....	14
Figura 12 – Modelos de aproximação por pesquisa local.....	15
Figura 13 – Abordagens de resolução: qualidade da solução versus tempo de execução.....	18
Figura 14 – Níveis de planeamento	19
Figura 15 – Página frontal de uma ordem de fabrico.....	20
Figura 16 – Sequência de operações de uma ordem de fabrico	21
Figura 17 – Tempo de processamento das operações no atual modo de planeamento.....	22
Figura 18 – Tempo de processamento das operações a considerar nos modelos	22
Figura 19 – Vista geral do ERP da empresa.....	23
Figura 20 – Recorte de uma folha de cálculo de planeamento da empresa	24
Figura 21 – Recorte de uma folha de cálculo evidenciando a alocação de operações.....	24
Figura 22 – Diagramas de Gantt gerados pelo planeamento da produção.....	25
Figura 23 – Recorte de uma folha de cálculo de tratamento de indicadores	26
Figura 24 – Representação do atraso de uma dada ordem de fabrico j	30
Figura 25 – Sobreposição de <i>setups</i> com operações para uma dada ordem de fabrico j_1	31
Figura 26 – Matriz de <i>setup</i> de uma dada máquina k	32
Figura 27 – Consecutividade de eventos de planeamento.....	33
Figura 28 – <i>Flowchart</i> do algoritmo de sequenciamento de operações.....	37
Figura 29 – <i>Flowchart</i> da rotina auxiliar de definição das variáveis auxiliares $T_{i,j}$ e T_{i_1,j_1,i_2,j_2}	38
Figura 30 – <i>Flowchart</i> do algoritmo de calendarização de operações	42
Figura 31 – <i>Flowchart</i> da rotina auxiliar de redefinição das variáveis auxiliares $T_{i,j}$ e T_{i_1,j_1,i_2,j_2}	43
Figura 32 – Sistema desenvolvido: definição inicial de um problema	45

Figura 33 – Sistema desenvolvido: parâmetros das máquinas e ordens de fabrico.....	46
Figura 34 – Sistema desenvolvido: parâmetros das operações	46
Figura 35 – Sistema desenvolvido: matrizes de <i>setup</i>	47
Figura 36 – Sistema desenvolvido: regras de prioridade.	47
Figura 37 – Sistema desenvolvido: calendários gerados.....	48
Figura 38 – Sistema desenvolvido: avaliadores de desempenho	49

Índice de tabelas

Tabela 1 – Avaliadores de desempenho do JSSP.....	9
Tabela 2 – Índices dos modelos.....	27
Tabela 3 – Avaliadores de desempenho na perspetiva da ocupação das máquinas.....	44
Tabela 4 – Dados gerais dos problemas analisados	50

1 Introdução

Os sistemas de *software* e os algoritmos de otimização para planeamento da produção começam a ganhar terreno face aos tradicionais sistemas manuais, em parte devido à contribuição de Henry Gantt. A descoberta protagonizada por Gantt, que permite a identificação de caminhos úteis para compreender as complexas relações entre Homens, máquinas, encomendas e o tempo, aliada à força das tecnologias de informação para recolher, visualizar, processar e partilhar os dados de forma rápida e fácil, permitiu agilizar e criar novas rotinas em processos de tomada de decisão (Herrmann 2006).

Apesar de produzirem e enviarem bens para os seus clientes e mercados, muitas empresas não tiraram partido destes progressos. Nestas, o sistema de planeamento da produção não passa de uma coleção de planos independentes e não relacionados frequentemente ignorados e com informação pouco confiável (Herrmann 2006). Não raras vezes, as soluções informáticas implementadas estão inoperacionais, quer por quantidade excessiva de informação, quer por desconhecimento dos agentes de planeamento das funções incorporadas, ou até mesmo pela inaplicabilidade dos modelos à realidade produtiva das empresas (Marques 1993).

Com a proliferação das novas tecnologias o acesso à informação torna-se mais fácil e célere. As empresas têm assim de procurar novas soluções, dotadas de qualidade e adequabilidade, por forma a responder aos requisitos de mercados informados e com distintas exigências. É necessário adotar mecanismos e rotinas ágeis e eficientes, tirando o máximo proveito dos recursos disponíveis. Um processo de tomada de decisão em sistemas de produção deverá considerar quatro classes de variáveis: custo, tempo, qualidade e flexibilidade. Os objetivos a atingir consistem em valores alvo, ou intervalos de valores, para uma dada variável (Chryssolouris 2006). O modelo tetraédrico desenvolvido por Chryssolouris (2006) enfatiza o inter-relacionamento entre as distintas classes de variáveis, advogando que não é possível otimizar simultaneamente o custo, o tempo, a qualidade e a flexibilidade. De acordo com Chryssolouris (2006) as variáveis relacionadas com o custo e o tempo são as mais utilizadas para avaliar quantitativamente o desempenho das empresas.

Segundo Pinedo (2008) um dos métodos de tomada de decisão com maior importância em diversos ambientes produtivos e de processamento de informação é a calendarização das operações (*scheduling*). Jacobs e Chase (2011), argumentando que fluxo de trabalho equivale a fluxo de caixa, classificam-no como um elemento central do processo produtivo. *Scheduling* pode então ser definido como um processo de tomada de decisão que é usado regularmente em muitas indústrias de produtos e serviços. Ele lida com a alocação de recursos a tarefas sobre um dado período de tempo e o seu objetivo é otimizar um ou mais objetivos (Pinedo 2008, 1).

O grande objetivo deste projeto visa a resolução de um problema de *scheduling*. Devidamente inserido num contexto técnico-científico, este projeto visa a análise e melhoria do processo de planeamento da produção de uma empresa industrial. Pretende-se a criação de um sistema de apoio à decisão convenientemente estruturado para o contexto empresarial a que se destina, um ambiente *job shop*, e que não deixe de lado, nem o poder das novas tecnologias, nem as considerações de Gantt relativas aos métodos de planeamento.

Neste capítulo introdutório é apresentada a envolvente industrial que serviu de base à realização do projeto. Inicialmente faz-se uma breve apresentação da empresa onde decorreu o projeto, a KTK (Kristaltek – Laser e Mecânica de Precisão, Lda.), seguindo-se uma

descrição do seu processo produtivo e lógica de criação de valor. Na parte final desta secção, além de ser feito um posicionamento do projeto face à atividade da empresa, no qual se estabelece um vínculo entre os objetivos do projeto e o problema em análise, são apresentados os temas abordados ao longo do presente relatório.

1.1 Apresentação da KTK

Foi no seio do setor têxtil que a KTK teve a sua origem. Inicialmente criada com a intenção de prestar apoio às máquinas e equipamentos de empresas do setor têxtil situadas no concelho de Barcelos, mais concretamente à parte mecânica e de manutenção, esta empresa foi aparecendo no mercado da mecânica de precisão oferecendo variadas soluções que, direta ou indiretamente, iam chegando a diversos clientes da indústria aeronáutica. A empresa foi-se equipando com máquinas, recursos e tecnologia, formalizando no ano de 2009 aquilo que viria a ser o nascimento de uma empresa tecnológica neste setor de atividade. A missão, a visão e os compromissos estabelecidos pela KTK podem consultados na Figura 1.

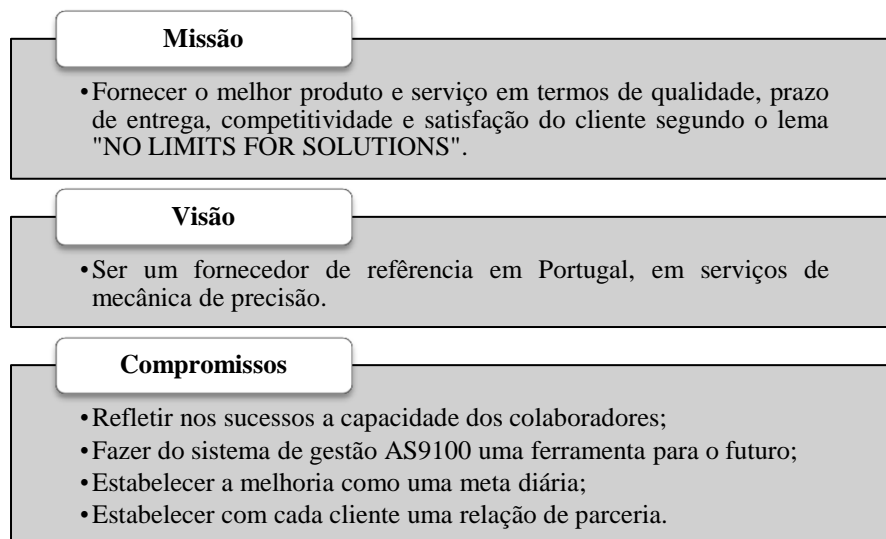


Figura 1 – Missão, visão e compromissos da empresa.

Por forma a conseguir satisfazer os mais diversos e rigorosos requisitos e especificações dos clientes, a KTK está devidamente certificada com as normas ISO9001 e AS9100. Estas normas autenticam o sistema de gestão da qualidade da empresa, dando ênfase à orientação que é dada ao cliente, nesta exigente área de maquinação de precisão por torneamento e fresagem. A certificação 9100 remete diretamente para a indústria aeroespacial e de defesa.

Sabendo da exigência e competitividade dos mercados em causa, a KTK foi-se equipando, ao longo dos últimos anos, com meios tecnológicos, sistemas e processos que vêm permitindo a disponibilização de um leque alargado de soluções inovadoras e dotadas de qualidade perante os clientes. Tais soluções passam pela mecânica de precisão por torneamento e fresagem, pelo corte por eletro-erosão e jato de água, pela retificação de superfícies e ainda pela gravação a laser. Os centros de maquinação e os tornos afiguram-se como elementos produtivos com maior volume de produção. Os clientes da empresa são, na sua grande maioria, empresas inseridas nas cadeias de abastecimento de diversas indústrias. Salientam-se as indústrias aeronáutica, automóvel, de medicina e de defesa e ainda a indústria em geral. A atividade desta empresa desenrola-se nas suas instalações, situadas em Barcelos, onde se desenvolvem a atividade operacional e os processos administrativos.

1.2 Processo produtivo da KTK

O processo de criação de valor na KTK, no qual se identificam cinco grandes etapas, tem o cliente como principal impulsionador. Este desencadeia o fluxo produtivo e é o destinatário dos produtos e serviços desenvolvidos, assumindo assim um papel central neste processo. Na Figura 2 estão representadas as etapas genéricas do processo produtivo.

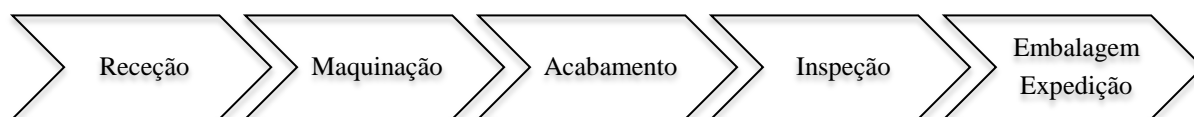


Figura 2 – Etapas do processo produtivo da empresa.

Tudo começa com a identificação e análise de uma necessidade do cliente, que irá ser avaliada pelos responsáveis da área comercial. Após uma fase de negociação e orçamentação entre a empresa e o cliente, em caso de mútuo acordo, dá-se início o processo.

Caso se trate do desenvolvimento de um produto novo é necessário proceder à sua industrialização. Aqui procede-se à criação dos modelos e dos desenhos técnicos (2D e 3D) que são peça essencial no desenrolar do processo produtivo. São também definidas quais as operações que darão origem ao produto final pretendido, bem como a sua sequência e alocação aos diversos equipamentos. Nesta etapa são ainda programadas as operações de maquinação, podendo haver recurso à criação e análise de simulações de produção. A estruturação das fichas de instrução, que farão parte da documentação que complementa a ordem de fabrico, bem como a verificação das necessidades de equipamento auxiliar são também realizadas nesta fase.

Caso não se trate de um produto novo, procede-se ao lançamento da ordem de fabrico correspondente sem se passar pela industrialização do produto. A ordem de fabrico é um documento que serve de roteiro para o material em causa, dando orientações aos operários encarregues da prossecução das diversas operações. Nela constam as diversas etapas que compõem o processo, bem como as secções onde ocorrem e a respetiva sequência. Este documento contém ainda a referência do material em causa, a datas de lançamento e entrega e os tempos de *setup* e de processamento das diversas operações (ver secção 3.1).

Após o lançamento da ordem de fabrico, procede-se à requisição de matéria-prima. Esta pode ter origem no próprio cliente, ou então, ser da responsabilidade da KTK. Caso se verifique esta última situação procede-se à averiguação das existências em inventário, e em caso de ser necessário adquirir, procede-se à encomenda perante fornecedores.

Seguidamente dá-se a primeira etapa do processo produtivo, a receção da matéria-prima. Após ter dado entrada na empresa, o material é etiquetado com as devidas referências, para garantir um maior controlo sobre os *stocks*. É também efetuada uma verificação visual e dimensional ao material rececionado, principalmente no caso de este ser da responsabilidade da KTK. Neste caso, é também requerido ao fornecedor um certificado do material, por forma a isentar a KTK de qualquer responsabilidade no caso de alguma não conformidade relacionada com as suas propriedades. Nesta etapa procede-se ainda ao armazenamento do material, que posteriormente vai ser preparado (cortado, se necessário) para poder abastecer os vários postos de trabalho.

A etapa seguinte é a da maquinação. Nesta fase são realizadas as diversas operações de maquinação que constam nas respetivas ordens de fabrico. Cada operação deste tipo consiste

na maquinação de uma série de peças, podendo ser necessário acrescentar previamente uma operação de validação da primeira peça (Figura 3).

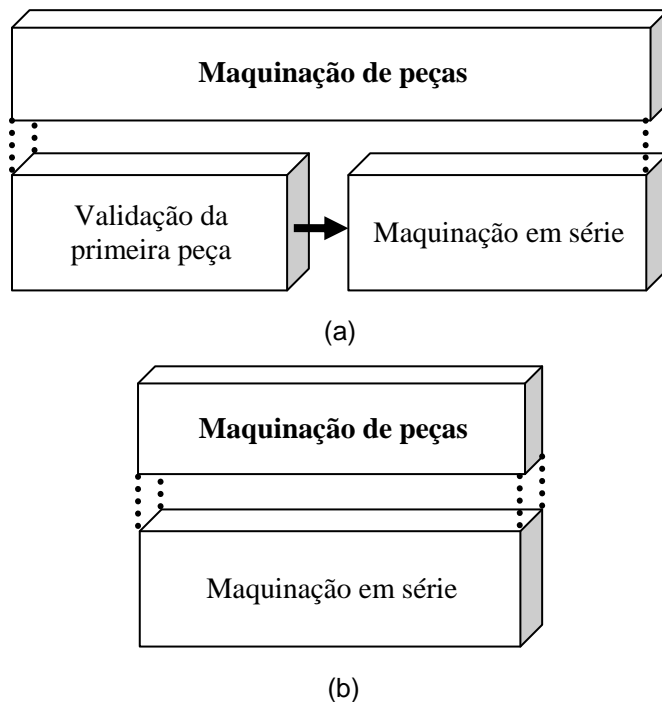


Figura 3 – Representação da operação de maquinação de peças.

Grande parte das operações de maquinação de peças necessita de um mecanismo de validação da primeira peça (Figura 3 (a)). Este consiste, habitualmente, na maquinação de uma peça, a primeira na respetiva operação, que é inspecionada pelos técnicos de qualidade por forma a averiguar a sua conformidade. O objetivo é, contudo, analisar a conformidade do equipamento. Caso este esteja conforme, procede-se à maquinação das restantes peças (maquinação em série). Caso contrário, procede-se à correção do equipamento (acerto de cotas, afinação da máquina, por exemplo) até este estar conforme.

Pode dar-se o caso da operação de maquinação não necessitar de uma operação prévia de validação da primeira peça. Esta situação é menos frequente que a anterior e, quando ocorre, a operação de maquinação apenas contempla a maquinação em série (Figura 3 (b)).

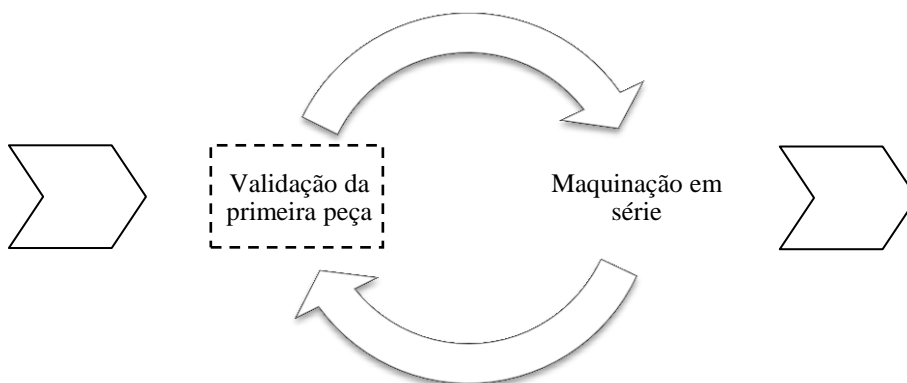


Figura 4 – Representação do carácter cíclico da etapa de maquinação.

Esta etapa do processo produtivo, a maquinação, é cíclica, pois este processo repete-se para todas as operações de maquinação que constam nas respetivas ordens de fabrico (Figura 4).

Em seguida, passa-se para a etapa do acabamento, que antecede a inspeção de peças, na qual as peças são limpas e polidas, conforme os requisitos e tipologias das mesmas. Este é um processo essencialmente manual que se aplica a todas as peças das diversas séries. Daí resulta a relativa morosidade desta etapa.

Segue-se a fase da inspeção, em que as diversas séries de peças são inspecionadas no laboratório de qualidade. É feita uma inspeção visual a todas as peças, sendo as inspeções dimensionais e geométricas feitas segundo critérios que advêm, quer dos padrões internos, quer das exigências dos clientes. Os resultados são devidamente registados nas folhas de inspeção que acompanham a ordem de fabrico. Caso seja necessário subcontratar alguma operação, as peças são expedidas para o respetivo agente, após esta etapa. As operações subcontratadas são, na maioria dos casos, operações para dar tratamento (de superfície, térmico, por exemplo) às peças. Após isto, as peças são então recebidas, voltando a ser inspecionadas pelos técnicos de qualidade. No caso de existirem peças não conformes, quer haja ou não subcontratação, as mesmas são, caso possível, retrabalhadas. Caso não seja possível, pode ser apresentado ao cliente um pedido de derrogação. Não sendo este aceite, ter-se-á que lançar em produção novas peças, caso o cliente ainda o pretenda. Caso contrário, a quantidade a enviar será inferior ao acordado.

Finalmente vem a etapa do embalamento e expedição. As peças são embaladas conforme os requisitos e posteriormente expedidas para os clientes. Caso não sejam devolvidas por supostas não conformidades, tem assim fim o processo de criação de valor. Peças eventualmente excedentes são embaladas e posteriormente colocadas em armazém. Estão assim prontas para ser expedidas, quando necessário.

1.3 Posicionamento do projeto na atividade da KTK

Na KTK, empresa que opera essencialmente numa lógica *engineer-to-order*¹, e que se dedica ao fabrico de pequenas séries, o balanceamento dos recursos com a carga de trabalho assume particular importância. Para se conseguir satisfazer as necessidades dos clientes, sobretudo os prazos de entrega, é necessário fazer uma gestão racional dos recursos, garantindo uma elevada taxa de ocupação destes com tarefas de valor acrescentado. Fruto das sucessivas montagens e acertos dos equipamentos, devido às constantes trocas de ferramentas e demais acessórios, os tempos improdutivos, caracterizados por não acrescentarem valor diretamente, são um elemento importante na atividade operacional da empresa.

A função planeamento da produção na KTK assume um papel importante na gestão dos tempos produtivos e improdutivos. É através desta atividade, tida como sendo de suporte, que é feita a alocação das diversas operações produtivas às máquinas disponíveis. Para se fazer uma análise aos tempos improdutivos, ao nível de se estudar com detalhe a sua origem e impacto, é importante perceber, desde logo, o modo como as operações são agendadas.

Dada a complexidade do processo produtivo da KTK, do tipo *job shop*, o processo de calendarização das operações não é tarefa de fácil resolução. Apesar da teórica importância que esta tarefa assume, não existe um mecanismo automatizado que crie os diversos calendários de produção. Além do processo ser essencialmente manual, é notória a

¹Processo produtivo no qual a empresa trabalha com o cliente na conceção/*design* do produto, produzindo-o após a compra das matérias, partes e componentes necessários ao seu fabrico (Jacobs e Chase 2011).

dificuldade na obtenção de indicadores de desempenho dos calendários gerados e a comparação entre calendários gerados por critérios distintos de prioridade é escassa.

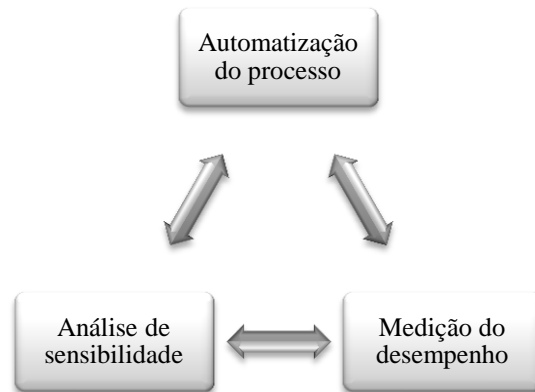


Figura 5 – Oportunidades de melhoria no processo de planeamento da produção.

Tal como a Figura 5 mostra, o projeto visa essencialmente o alcance de três objetivos distintos mas inter-relacionados. A modelação e construção de um sistema de apoio à decisão, além de garantir uma agilização do processo de planeamento, por forma a este ficar mais automatizado e flexível, gerando calendários de forma rápida e eficaz, proporcionará também a obtenção célere de indicadores de desempenho dos diversos calendários gerados. Será ainda possível a comparação de calendários gerados através de distintas regras de prioridade, ao ponto de ser possível fazer uma análise de sensibilidade às diversas regras consoante a instância de dados em causa e os objetivos a atingir em cada momento. Através das melhorias introduzidas por este projeto espera-se, de forma indireta, uma utilização eficaz dos recursos produtivos, minimizando os tempos improdutivos e o impacto destes no tempo de resposta aos clientes.

1.4 Temas abordados e sua organização

Este relatório de dissertação encontra-se dividido em 6 capítulos. No presente capítulo, além de ser feita uma apresentação da empresa onde o projeto ocorreu e do seu processo produtivo, são apresentados os objetivos deste projeto.

No segundo capítulo faz-se a fundamentação teórica do JSSP (*Job Shop Scheduling Problem*). Apresentam-se os pressupostos, as medidas de desempenho e as formas de classificação e representação do JSSP. São ainda expostas considerações relativas aos tempos de *setup*, à complexidade deste tipo de problemas e às formas de o resolver.

No terceiro capítulo é apresentado o problema tratado no decurso do projeto. Neste capítulo descreve-se o atual procedimento para a calendarização das operações e a forma como os tempos de *setup* são tratados para efeitos de planeamento da produção. São ainda expostas algumas considerações relativas às ordens de fabrico e à medição do desempenho da empresa.

Nos capítulos quatro e cinco apresenta-se a solução proposta para o problema estudado. No capítulo quatro apresenta-se o modelo heurístico criado baseado em regras de prioridade. É ainda exposto o modelo de programação linear utilizado para definir o problema. No capítulo cinco apresenta-se o sistema desenvolvido, nomeadamente a sua interface e o seu modo de funcionamento, e a forma foi testado como o seu desempenho em contexto real.

No sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões. Neste capítulo são expostas as conclusões que resultam do desenrolar do projeto, oportunidades de melhoria passíveis de serem implementadas no sistema desenvolvido e perspetivas de trabalhos futuros.

2 Revisão da literatura

Na sua conceção clássica, o JSSP é descrito, segundo Fattahi, Saidi e Jolai (2007), como um problema de planeamento da produção onde se pretende alocar um conjunto de ordens de fabrico (*jobs*) com sequências pré-determinadas de operações a diversos recursos produtivos presentes numa oficina (*shop*), num dado instante de tempo. Cada ordem de fabrico consiste num roteiro pré-estabelecido de operações cuja sequência deve ser respeitada. Estas imposições, juntamente com a limitação de capacidade dos distintos recursos produtivos, compõem as restrições tecnológicas. No âmbito dos problemas de *scheduling*, os problemas de *job shop* são tidos como um dos problemas de natureza combinatoria mais complexos e difíceis (Adams, Balas e Zawack 1988).

Não é possível mencionar com precisão quem foi o primeiro autor a propor o JSSP na forma como é tratado nos dias de hoje. Para alguns, a origem do JSSP está diretamente ligada a um popular problema de sequenciamento de 10 ordens de fabrico e 10 máquinas, introduzido há mais de 50 anos (Błażewicz, Domschke e Pesch 1996).

Desde então muitos estudos acerca do JSSP têm sido feitos, quer em ambiente académico, quer industrial. Algumas das contribuições daí resultantes merecem ser mencionadas, dada a sua importância na área. Nesta secção é então feito um levantamento da literatura publicada sobre o JSSP, situando-se assim este projeto no contexto técnico-científico em que se insere.

2.1 Pressupostos

Na maior parte dos trabalhos publicados na literatura são definidos certos pressupostos, com a finalidade de simplificar os JSSP. Os pressupostos mais recorrentes aquando da sua resolução são (French 1982; Moghaddas e Houshmand 2008):

- i. Cada ordem de fabrico tem uma sequência única e pré-determinada;
- ii. Cada operação apenas pode ser processada numa máquina (não há rotas alternativas);
- iii. Os tempos de processamento das diversas operações são conhecidos e constantes;
- iv. Os tempos de *setup* em cada máquina são conhecidos e dependentes da sequência;
- v. Cada ordem de fabrico tem uma data mínima de início de processamento;
- vi. Iniciando-se uma dada operação numa dada máquina, esta não pode ser interrompida;
- vii. A sobreposição de operações da mesma ordem de fabrico não é permitida;
- viii. A sobreposição de operações com *setups* na mesma máquina não é permitida;
- ix. Cada máquina está permanentemente disponível para produção;
- x. Não há restrições quanto ao tamanho das filas de espera e ao tempo gasto nestas;
- xi. O tempo despendido em movimentações entre as máquinas é desprezável;
- xii. A capacidade das máquinas é o único recurso limitado.

Todos estes pressupostos, à exceção do ix, foram utilizados na definição dos modelos que suportam o sistema de apoio à decisão construído. Apesar de se considerar que as máquinas estão permanentemente disponíveis para produção, para cada máquina há um parâmetro que indica a hora da sua disponibilidade inicial. Antes dessa hora as máquinas estão indisponíveis, não podendo ter operações e *setups* alocados.

2.2 Tempos de *setup*

Nas empresas pertencentes à indústria mecânica, o *setup* consiste no tempo despendido em acertos, ajustes, limpeza e montagem de gabaritos² entre operações, ao qual se adiciona o tempo gasto na troca de ferramentas. Muitos dos estudos feitos acerca do JSSP assumem que os tempos de *setup* não dependem da sequência de operações. Moghaddas e Houshmand (2008) referem que a maioria dos investigadores assume tempos de *setup* desprezáveis ou como uma parte do tempo de processamento das respetivas operações.

Segundo Allahverdi, Gupta e Aldowaisan (1999), em centros automáticos de torneamento o tempo de *setup* depende da diferença do número e tipo de ferramentas montadas atualmente na turreta³ das que são requeridas para a próxima operação. Quando se verifica esta situação, os tempos de *setup* denominam-se dependentes da sequência de operações.

De acordo com Krajewski et al. (1987) a produção baseada em lotes de reduzida dimensão com grandes tempos de *setup* penaliza o índice de produtividade. Já Wilbrecht e Prescott (1969) referem que quando se trabalha num ambiente de *job shop* na sua capacidade máxima, ou perto dela, os *setups* assumem grande importância. Por intermédio de simulações, chegaram à conclusão que os tempos de *setup* dependentes da sequência de operações assumem um papel crítico no desempenho de operações em *job shop*. Park e Lee (2012) referem que este tipo de *setups* têm recebido pouca atenção dos investigadores, apesar da sua importância nos JSSP reais.

O estudo levado a cabo por Kim e Bobrowski (1994) mostra que, caso seja dependente da sequência de operações, o tempo de *setup* deve ser explicitamente considerado nas decisões de planeamento. O referido estudo mostra também que a informação relativa às datas devidas de entrega deve ser incluída nas decisões de planeamento, para que o desempenho relacionado com os prazos de entrega seja melhor.

Em muitas situações o tempo de *setup* é diretamente proporcional ao custo de *setup*. Isto ocorre frequentemente quando a preocupação apenas se limita ao tempo improdutivo das máquinas. No entanto existem outras situações, em que o custo do *setup* a realizar entre o processamento de duas operações é relativamente alto, apesar do seu tempo ser reduzido. Quando o tempo é proporcional ao custo, um calendário que é ótimo relativamente ao tempo de *setup*, é também ótimo em relação ao custo (Allahverdi, Gupta e Aldowaisan 1999).

Na KTK, a ocorrência de *setups* significa perdas de produção. Sendo as perdas de produção diretamente proporcionais ao tempo perdido em preparação dos equipamentos, intuitivamente se conclui que o custo de *setup* é proporcional ao tempo de *setup*. Na definição dos modelos que servem de base ao sistema de apoio à decisão, os tempos de *setup*, além de não fazerem parte do tempo de processamento das operações, são considerados como sendo dependentes da sequência de operações. Uma eventual otimização relativa a tempos de *setup* corresponde, de igual maneira, a uma otimização relativa a custos de *setup* (custos de perdas de produção).

2.3 Medidas de desempenho

De acordo com French (1982), o objetivo do JSSP genérico é a criação de uma calendarização para as diversas operações, verificando-se a:

²Dispositivo utilizado para garantir a repetibilidade de determinada operação. Este permite prevenir e detetar a presença de eventuais não conformidades.

³Mecanismo de alojamento de ferramentas em equipamentos de maquinaria.

- i. compatibilidade entre as restrições tecnológicas (sequência de operações dentro da mesma ordem de fabrico; capacidade das máquinas) e o calendário gerado;
- ii. garantia do ótimo de acordo com o critério de avaliação da performance adotado.

Os critérios a adotar para medir e guiar a função planeamento não são de fácil definição. French (1982) refere que os critérios possíveis são numerosos e complexos, podendo-se verificar alterações dos objetivos a atingir ao longo do tempo, o que dificulta a sua definição. Apresentam-se na Tabela 1 os avaliadores de desempenho mais utilizados em JSSP.

Tabela 1 – Avaliadores de desempenho do JSSP (French 1982).

Notação	Designação	Ordem de fabrico j
C_j	<i>Completion time</i>	Data efetiva de conclusão
W_j	<i>Total waiting time</i>	Tempo total gasto em filas de espera
F_j	<i>Flow time</i>	Tempo de permanência no sistema
L_j	<i>Lateness</i>	Desvio entre a data de conclusão e a data devida de entrega
T_j	<i>Tardiness</i>	Atraso na conclusão
E_j	<i>Earliness</i>	Antecipação na conclusão

Os avaliadores mencionados são frequentemente tratados pelo seu valor médio ou máximo. Genericamente, o avaliador X tem o seu valor médio designado por \bar{X} e o seu valor máximo designado por X_{max} (French 1982). Pode também ser utilizado um valor ponderado, $\sum w_j (w_j \times X_j)$, em que w_j e X_j representam respetivamente a importância (peso) e o valor do avaliador para a ordem de fabrico j (Pinedo 2008).

Os critérios de avaliação da performance da função planeamento podem ser divididos em 3 categorias distintas (French 1982, 12-13):

- i. critérios baseados nas datas de conclusão;
- ii. critérios baseados nas datas devidas de entrega;
- iii. critérios baseados nos custos de *stocks* e de utilização.

A satisfação das datas devidas de entrega acarreta duas implicações distintas. Primeiro, a entrega sem atraso de produtos acabados e serviços resulta em clientes mais satisfeitos. Segundo, a entrada sem atraso de WIP⁴ nas próximas etapas de produção resulta em melhor capacidade de planeamento e controlo (Sun e Noble 1999).

Com a adoção de práticas *lean*⁵ e JIT⁶, as organizações podem dar mais importância à redução e eliminação de *stocks*. A adoção de critérios baseados nas datas devidas de entrega, contudo, pode ser também bastante importante na definição do posicionamento das empresas nos mercados em que estão inseridas (Chryssolouris 2006; Marques 1993).

⁴*Work-in-progress* (trabalho em curso de fabrico).

⁵Filosofia produtiva baseada no sistema Toyota de produção que tem como objetivo principal a redução do desperdício. Com a implementação da filosofia *lean* numa organização, potencialmente pode-se esperar, entre outros resultados, uma redução do nível de inventário (Jacobs e Chase 2011).

⁶*Just-in-time*. Princípio da filosofia *lean* que implica a produção somente da quantidade necessária, apenas no momento em que esta é necessária, para abastecer a entidade a jusante (Jacobs e Chase 2011).

2.4 Classificação e representação gráfica

Existem mecanismos próprios de classificação de problemas de planeamento do género JSSP. Estes tornam o processo de identificação dos problemas mais fácil e célere, devido ao nível de padronização que incorporam. O esquema taxonómico desenvolvido por Conway, Maxwell e Miller (1976) permanece ainda, nos dias de hoje, como um dos modelos mais divulgados para o efeito. Este assenta nos seguintes parâmetros: $n/m/A/B$. Sabe-se que:

- n equivale ao número de ordens de fabrico;
- m equivale ao número de máquinas;
- A representa o tipo de fluxo produtivo (G para *job shop*; F para *flow shop*);
- B representa a medida de desempenho para avaliar a calendarização.

Considere-se o seguinte exemplo: $10/4/G/T_{max}$. Esta é a forma de mencionar um problema de *job shop*, pretendendo-se calendarizar 10 ordens de fabrico que recorrem a 4 máquinas. O objetivo do problema é a minimização do atraso máximo.

Para representar graficamente problemas do tipo *job shop* existem diversos mecanismos, sendo o grafo disjuntivo e o diagrama de Gantt dois dos mais recorrentes para o efeito.

O grafo disjuntivo é uma metodologia utilizada frequentemente para representar problemas de sequenciamento de operações. Nesta representação existe um nodo para cada operação e dois nodos fictícios que representam o início e fim da calendarização. A ligação entre os diversos nodos é feita através de arcos. Os arcos conjuntivos (direcionados) correspondem às restrições de precedência (relações de precedência entre operações da mesma ordem de fabrico) e os pares de arcos disjuntivos (com direções opostas) correspondem às restrições de capacidade (ligação entre operações realizadas na mesma máquina) (Pinedo 2008).

Aos arcos conjuntivos está associado o tempo de processamento das operações e aos arcos disjuntivos o tempo de *setup* a realizar entre as respetivas operações. Na Figura 6 está representado um grafo disjuntivo para um problema $3/3/G/W_{max}$.

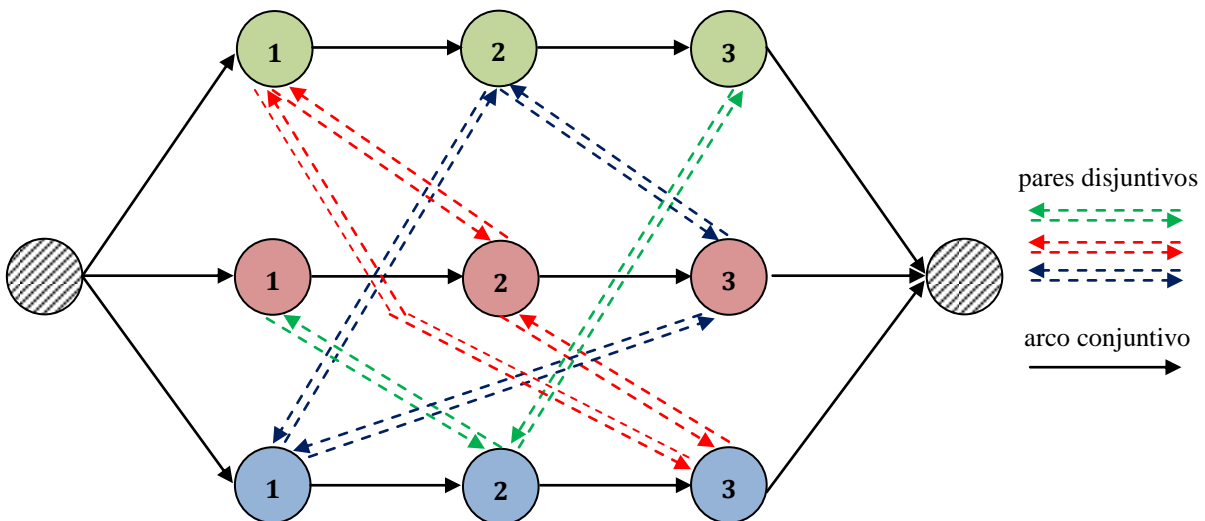


Figura 6 – Grafo disjuntivo para um problema $3/3/G/W_{max}$.

O processo de sequenciamento de uma dada máquina baseia-se na definição da direção dos diversos arcos disjuntivos que lhe estão associados (ordenação do processamento das diversas operações realizadas na máquina). O objetivo do problema passa por criar um grafo acíclico (inexistência de conflitos de precedência entre operações), mantendo-se para cada par de arcos disjuntivos apenas um membro (Sun e Noble 1999). Na Figura 7 está representada em grafo disjuntivo uma possível solução para o problema supracitado, sendo a consecutividade entre operações na mesma máquina indicada a traço mais forte. Os arcos disjuntivos deixam de existir aos pares, passando a figurar isoladamente, tal como os arcos conjuntivos.

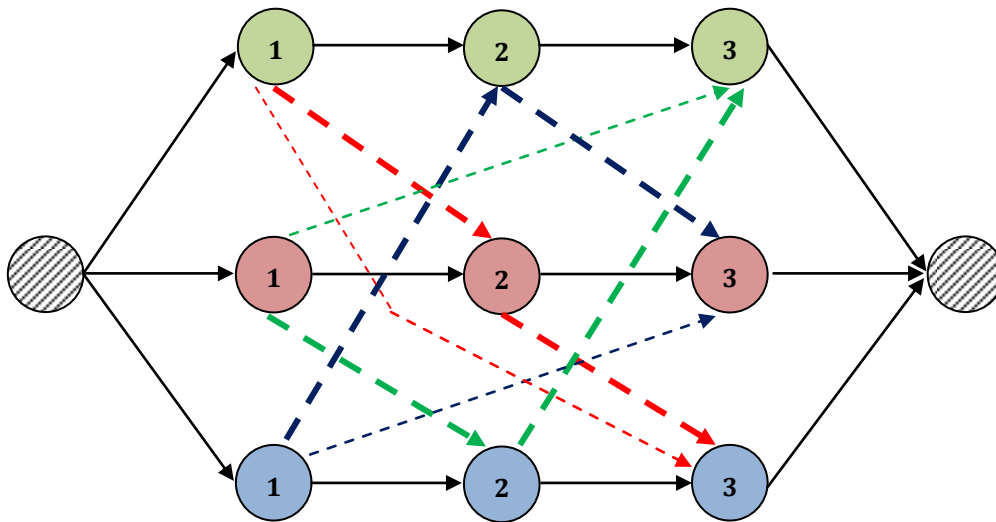


Figura 7 – Grafo disjuntivo acíclico para um problema $3/3/G/W_{max}$.

O diagrama de Gantt é outra ferramenta utilizada para representar graficamente problemas de calendarização de operações. Esta representação é bastante útil para representar os resultados de planeamento, contemplando o tempo de duração das operações e as inter-relações entre estas, sendo utilizado em larga escala pela indústria e pela academia. Este consiste numa forma específica de gráfico de barras, onde o eixo horizontal representa o tempo e o eixo vertical representa um recurso (máquina ou colaborador, por exemplo). Cada barra representa o tempo de processamento de determinada operação (Chryssolouris 2006, 550).

Na Figura 8 apresenta-se o diagrama de Gantt para o problema representado anteriormente com os grafos disjuntivos. Entre operações consecutivas e antes da primeira operação a realizar em cada máquina, há um espaço de tempo reservado à realização dos *setups*.

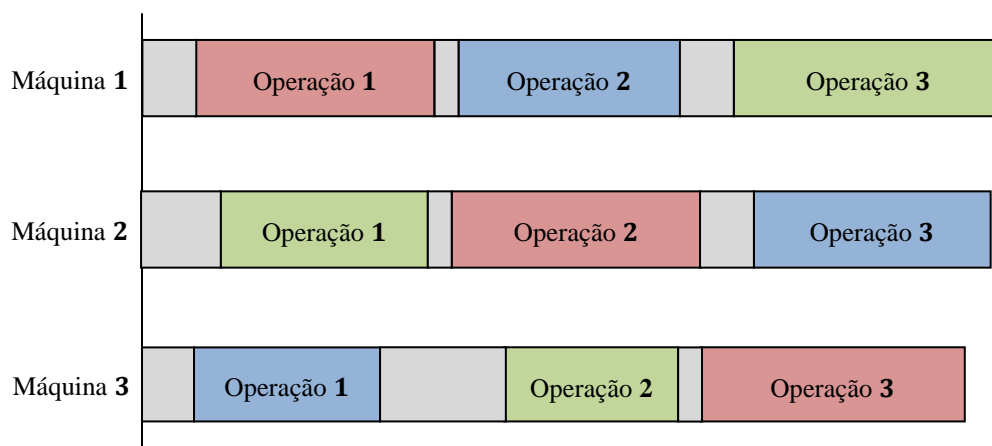


Figura 8 – Diagrama de Gantt para um problema $3/3/G/W_{max}$.

Este tipo de diagrama é muito útil em ambiente de *job shop*. As restrições tecnológicas impedem a sobreposição de barras na mesma máquina e de barras correspondentes à mesma ordem de fabrico. Além de representar o tempo gasto para completar determinada operação, este diagrama permite averiguar o tempo improdutivo despendido em espera e *setups* pelas diversas ordens de fabrico e máquinas, de forma rápida e intuitiva.

2.5 Complexidade

A noção de eficiência de um algoritmo, aquando da resolução de determinado problema, está normalmente ligada ao tempo necessário para alcançar uma solução final. Este tempo pode ser convenientemente expresso em termos de uma variável, o tamanho da instância do problema, que traduz a quantidade de dados necessária para descrever o problema (Garey e Johnson 1979).

Um algoritmo de tempo polinomial, ou algoritmo “eficiente”, é aquele em que a função da complexidade é $O(p(n))$ para qualquer função polinomial p . O tempo necessário para alcançar a solução final é função polinomial da dimensão n do problema. Já num algoritmo de tempo exponencial, ou algoritmo “ineficiente”, a função da complexidade é $O(e(n))$ para qualquer função exponencial e . Nestes, o tempo de execução do algoritmo é função exponencial de n . Quando se está perante um problema de larga instância (n elevado), a distinção entre estes dois tipos de algoritmos assume particular importância (Garey e Johnson 1979; Papadimitriou 2003).

A classe de problemas que podem ser resolvidos com algoritmos de tempo polinomial, ou de forma eficiente, é denominada por P. Já NP designa a classe de problemas cuja solução pode ser verificada em tempo polinomial, apesar de apenas poderem ser resolvidos com algoritmos de tempo polinomial não determinísticos. Um algoritmo não determinístico, contrariamente ao que acontece num algoritmo determinístico, pode revelar diferentes comportamentos em diferentes execuções. Um problema a resolver por um algoritmo deste tipo, tanto pode ser resolvido em tempo polinomial ou exponencial, consoante as escolhas tomadas ao longo da execução (Garey e Johnson 1979). Na ilustração seguinte apresenta-se um diagrama de Euler que evidencia as diferentes classes de complexidade.

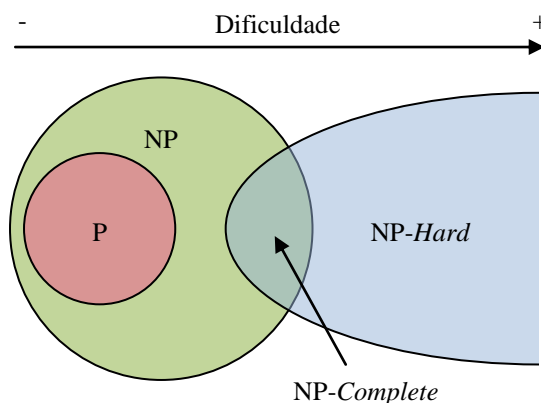


Figura 9 – Classes de complexidade (adaptado de Garey e Johnson (1979) e Papadimitriou (2003)).

Os problemas mais difíceis da classe NP estão inseridos na classe *NP-Complete*. O tempo de resolução destes problemas cresce rapidamente com o aumento do tamanho da instância, fazendo com que estes problemas sejam frequentemente abordados com métodos heurísticos. Fruto da sua natureza combinatoria, o tempo computacional de resolução destes problemas torna-se inviável, sujeitando assim a sua resolução a algoritmos de aproximação. Por último vem a classe de problemas *NP-Hard*. Os problemas inseridos nesta classe são pelo menos tão

difíceis quanto os problemas NP-*Complete* mais difíceis, não sendo conhecidos algoritmos “eficientes” para a sua resolução. Também na resolução destes, são utilizados frequentemente métodos de aproximação para garantir soluções satisfatórias (Garey e Johnson 1979; Papadimitriou 2003).

Os problemas do tipo *job shop* são amplamente reconhecidos como sendo dos de mais difícil resolução dentro da classe NP-*Complete* (Garey e Johnson 1979; Moghaddas e Houshmand 2008; Park e Lee 2012). O grau de complexidade destes problemas é mais elevado, caso se considerem os tempos de *setups* como sendo dependentes da sequência de operações (Sun e Noble 1999). Segundo Zandieh, Fatemi e Moattar (2006), os problemas de planeamento com este tipo de *setups* pertencem à classe de problemas de mais difícil resolução. Um JSSP deste tipo é classificado, segundo Park e Lee (2012), como NP-*Hard*.

A natureza combinatória dos problemas de planeamento em *job shop*, aliada à imposição de restrições complexas, torna a sua otimização difícil e demorada. A utilização de heurísticas ou algoritmos de aproximação é assim justificada.

2.6 Abordagens de resolução

Para problemas de dimensão real, é prática comum sacrificar-se a obtenção de uma solução ótima em detrimento de uma solução satisfatória, alcançada através de métodos heurísticos num curto espaço de tempo. Os modelos utilizados na resolução de JSSP podem assim ser divididos em duas classes: modelos de solução ótima e modelos de aproximação (Błażewicz, Domschke e Pesch 1996; Pacheco e Santoro 1999).

2.6.1 Modelos de solução ótima

Como modelos de otimização destacam-se as técnicas de enumeração explícita e implícita. A programação inteira, o *branch and bound* e a programação dinâmica são abordagens usadas na resolução de JSSP numa lógica de enumeração implícita (Figura 10).

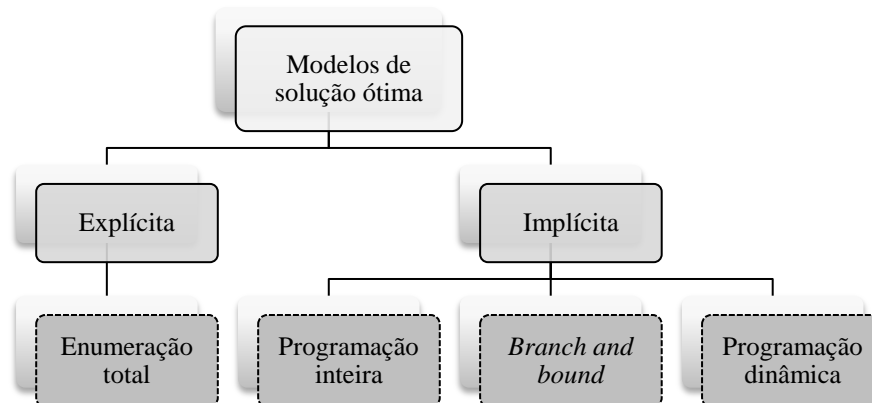


Figura 10 – Modelos de solução ótima (adaptado de Pacheco e Santoro (1999)).

Na enumeração total todas as soluções são avaliadas. A forma como são definidas as variáveis de decisão, as restrições e a função objetivo é que diferencia a forma como a solução é alcançada, pois não se utilizam características específicas para direcionar a procura da solução (Hillier e Lieberman 2001; Pacheco e Santoro 1999).

Os problemas de JSSP podem ser formulados como problemas de programação linear e, em particular, de programação inteira. A formulação destes problemas contempla, além da função objetivo e de outras particularidades, dois grandes conjuntos de restrições: precedência de operações na mesma ordem de fabrico e limitação da capacidade das máquinas. Neste

método, o tempo de alcance de uma solução está condicionado às aplicações de *software* de otimização e do *hardware* disponíveis no momento.

A técnica mais frequente na resolução de problemas de programação inteira ou inteira mista é o *branch and bound*. Esta técnica utiliza uma estrutura de procura em árvore para a construção da solução, analisando, a cada ramificação, os nós que estão qualificados. Um nó qualificado é aquele que apresenta um limite inferior da solução inferior ao limite superior (melhor solução completa já encontrada ou solução inicial). Os nós que não satisfaçam este requisito são descartados, eliminando-se todas as ramificações deles decorrentes. Os nós qualificados são desdobrados em novas soluções, de modo a ser possível encontrar soluções possíveis de melhor valor que o limite superior. Caso sejam encontradas, o limite superior é atualizado e a procura prossegue (Hillier e Lieberman 2001; Pacheco e Santoro 1999).

As etapas genéricas deste método, segundo Hillier e Lieberman (2001), são as seguintes:

- i. *Branching*: divisão de um nó (problema) em dois ou mais nós (subproblemas);
- ii. *Bounding*: obtenção de um limite por nó que indica quão boa pode ser a solução;
- iii. *Fathoming*: seleção dos nós a ter em consideração na próxima etapa.

A sua simplicidade, aliada à sua eficiência computacional, são as razões que, de acordo com Pinedo (2008), tornam o *branch and bound* bastante popular na resolução destes problemas.

Na programação dinâmica, por oposição ao que acontece na enumeração explícita, muitas das soluções vão sendo eliminadas à medida que se vai enumerando. Esta técnica é utilizada para criar uma sequência de decisões inter-relacionadas. É feita uma divisão de cada problema em subproblemas, que vão sendo resolvidos sequencialmente até o problema inicial estar completamente resolvido. A decisão tomada em cada subproblema tem impacto nas decisões a serem tomadas em subproblemas subsequentes. Quando comparado com a enumeração explícita, este método permite grandes poupanças computacionais (Hillier e Lieberman 2001; Pacheco e Santoro 1999).

2.6.2 Modelos de aproximação

As heurísticas de pesquisa local, as regras de prioridade⁷ e a heurística *shifting bottleneck* são algoritmos de aproximação utilizados na resolução de JSSP (Błażewicz, Domschke e Pesch 1996). Os modelos assentes em heurísticas de pesquisa local, após explorar um subconjunto do espaço de soluções possíveis para os problemas, escolhem a solução que melhor desempenho apresenta. Os modelos baseados em regras de prioridade e na heurística *shifting bottleneck* denominam-se algoritmos de passo único (*single-pass*), visto construírem a solução de uma só vez, com apenas uma execução do algoritmo (Pacheco e Santoro 1999).

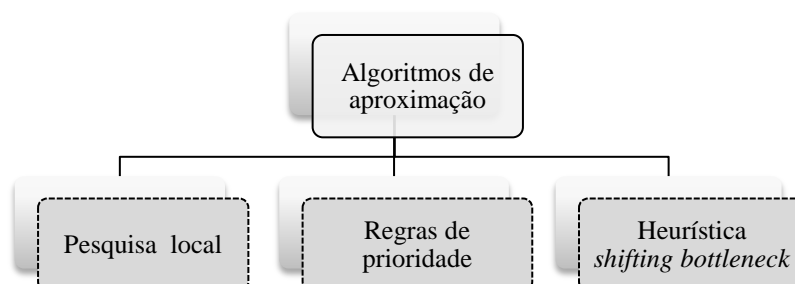


Figura 11 – Modelos de aproximação.

⁷Também designadas por *priority rules* ou *dispatching rules*.

As heurísticas de pesquisa local podem ser divididas em dois tipos relativamente à presença ou não de mecanismos de intensificação. Quando a pesquisa se dá de forma aleatória, sem a presença de mecanismos de intensificação, efetuam-se aleatoriamente trocas de posição entre as diversas ordens de fabrico, por forma a avaliar os resultados obtidos nas diversas soluções. Já na pesquisa com intensificação a procura ocorre de forma orientada à sequência de operações e/ou aos gargalos (Pacheco e Santoro 1999; Pinedo 2008).

Quando a pesquisa com intensificação ocorre sem diversificação, apenas se altera a solução se isso corresponder a uma melhoria da função objetivo. Neste caso a pesquisa pode ficar restrita a uma região e a solução corresponder apenas a um ótimo local. Quando se verifica a presença de mecanismos de diversificação, o espaço de pesquisa é alargado para permitir que alternativas piores que a solução atual sejam também elas ponderadas, por forma sair das regiões que contêm ótimos locais. O *tabu search*, o *simulated annealing* e os algoritmos genéticos pertencem a esta categoria (Pacheco e Santoro 1999; Pinedo 2008).

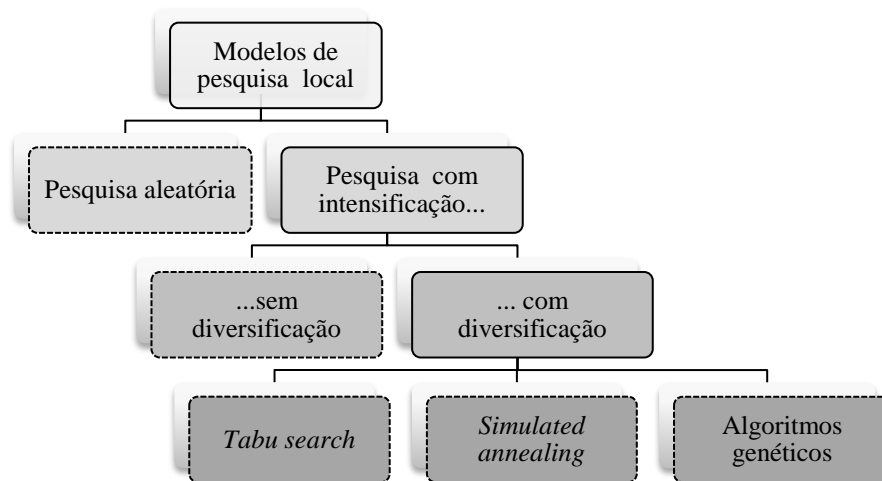


Figura 12 – Modelos de aproximação por pesquisa local (adaptado de Pacheco e Santoro (1999)).

Tidos como algoritmos de melhoria, o *simulated annealing* e o *tabu search* permitem que, a partir de uma solução inicial, se gerem novas vizinhanças e novas soluções. Sempre que uma solução melhor que a anterior, ou que a inicial, é encontrada, o algoritmo tem-na como sendo a melhor. A principal diferença entre estes dois algoritmos está no critério de aceitação de novas soluções. No *simulated annealing* este critério é baseado num processo estocástico, enquanto que no *tabu search* é baseado num processo determinístico (Pinedo 2008, 382).

O *simulated annealing*, técnica descrita por Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi (1983), é baseado nos princípios da mecânica e da física, nos quais o processo de recozimento de uma substância engloba uma fase de aquecimento e, em seguida, uma fase de arrefecimento lento, para permitir a obtenção de uma estrutura cristalina. Com o decorrer do processo de otimização a solução atual vai sendo substituída por uma da sua vizinhança. A solução vizinha é selecionada com uma dada probabilidade, que depende da degradação da função objetivo (diferença na função objetivo entre a solução atual e a solução gerada pelo vizinho) e da temperatura atual (Talbi 2009).

No *tabu search*, técnica proposta por Glover (1986), após a obtenção da solução inicial, é criada uma lista de movimentos de melhoria, dos quais se pretende a criação de uma solução melhor que a atual. Para cada um destes movimentos é criada uma nova vizinhança, sendo selecionado o melhor vizinho. Este mecanismo permite armazenar o historial de soluções numa lista *tabu*, impossibilitando que qualquer solução seja ponderada mais que uma vez (Pinedo 2008, 382).

Originalmente desenvolvidos por Holland (1975), os algoritmos genéticos são um método de pesquisa baseado em mecanismos de seleção natural. As suas técnicas de pesquisa permitem identificar a solução ótima, ou uma solução perto desta, nas populações de soluções criadas. Os algoritmos genéticos operam iterativamente (cada iteração corresponde a uma geração) num número fixo de soluções candidatas da população, designadas por cromossomas. Em cada geração os melhores cromossomas são levados a criar novas soluções (crianças) usando características de cada um dos pais. Os piores membros da população (com pior função objetivo) desaparecem para dar lugar a soluções mais aptas. Ao contrário do que acontece no *simulated annealing* e no *tabu search*, em que as vizinhanças são geradas a partir de uma única solução, nos algoritmos genéticos as vizinhanças são geradas combinando partes de diferentes soluções da população atual (Chaudhry 2012; Pinedo 2008)

As regras de prioridade são provavelmente as heurísticas mais frequentemente usadas na resolução de JSSP na prática, devido à baixa complexidade computacional e à facilidade de implementação (Błażewicz, Domschke e Pesch 1996). Estas regras permitem a atribuição de prioridades às ordens de fabrico que estão em espera para processamento. Tais prioridades podem ser definidas a partir de atributos pertencentes às ordens de fabrico, operações, máquinas ou, ainda, ao estado da oficina. A dificuldade do processo de seleção da próxima operação a calendarizar resulta do facto de haver $n!$ formas diferentes de sequenciar n ordens de fabrico existentes numa dada fila de espera (Rajendran e Holthaus 1999).

Quando o objetivo é a minimização da soma dos atrasos ou dos tempos de permanência das ordens de fabrico na oficina, a utilização destas regras é bastante frequente. Em ambientes extremamente imprevisíveis e complexos, tais como o do *job shop*, estas regras assumem grande utilidade (Baker 1998). A chegada intermitente de diversas ordens de fabrico aos centros de trabalho faz com que o número de calendários produtivos possíveis seja elevado. A simulação por computador é, neste caso, segundo Jacobs e Chase (2011), a única forma prática e viável de determinar o desempenho relativo das diversas regras de prioridade.

Na literatura existe uma enorme diversidade de regras de prioridade. Blackstone Jr, Phillips e Hogg (1982) apresentam 34 regras, enquanto que Pinedo (2008) descreve 15 regras genéricas. Algumas dessas regras apresentam-se de seguida. São elas⁸:

- i. FIFO (*First In First Out*): é selecionada a operação que mais cedo chegou à fila de espera da respetiva máquina;
- ii. EDD (*Earliest Due Date*): é selecionada a operação correspondente à ordem de fabrico com menor data devida de entrega;
- iii. SPT (*Shortest Processing Time*): é selecionada a operação com menor tempo de processamento;
- iv. LWKR (*Least Work Remaining*): é selecionada a operação correspondente à ordem de fabrico com menor valor da soma das durações das operações ainda por processar;
- v. WINK (*Work In Next Queue*): é selecionada a operação correspondente à ordem de fabrico que tem a próxima operação a ser processada na máquina com menor carga;
- vi. MDD (*Modified Due Date*): é selecionada a operação com menor data de entrega modificada. A data de entrega modificada é obtida da seguinte forma:

⁸ D_j , n_j e $p_{i,j}$ representam respetivamente a data devida de entrega, o número de operações e o tempo de processamento da i -ésima operação para uma dada ordem de fabrico j . z corresponde à operação presente na fila de espera a aguardar processamento e t representa o instante de tempo atual.

$$MDD_j = \max \left\{ D_j; t + \sum_{i=z}^{n_j} (p_{i,j}) \right\} \quad (1)$$

- vii. *Min. Slack (Minimum Slack Time)*: é selecionada a operação correspondente à ordem de fabrico com menor folga. A folga é obtida da seguinte forma:

$$Slack_j = D_j - \sum_{i=z}^{n_j} (p_{i,j}) - t \quad (2)$$

- viii. *Slack/OPN (Least Slack per Operation)*: é selecionada a operação correspondente à ordem de fabrico com menor folga por número de operações ainda por processar.

- ix. *CR (Critical Ratio)*: é selecionada a operação com menor rácio crítico. O rácio crítico é obtido da seguinte forma:

$$CR_j = \frac{D_j - t}{\sum_{i=z}^{n_j} (p_{i,j})} \quad (3)$$

- x. *RND (Random)*: é selecionada uma operação aleatoriamente.

Caso as regras variem com o instante de tempo de sequenciamento, designam-se dinâmicas. Caso isso não aconteça, denominam-se estáticas (Pinedo 2008).

A heurística *shifting bottleneck*, desenvolvida por Adams, Balas e Zawack (1988), é um método de aproximação que procura resolver o JSSP minimizando o *makespan*⁹ total. As máquinas são sequenciadas uma a uma, iterativamente. A cada iteração, uma das máquinas ainda não sequenciadas é identificada como gargalo, sendo alvo de sequenciamento. O sequenciamento é feito como de um problema de máquina única se tratasse, com o auxílio da representação via grafos disjuntivos. Após uma máquina ser sequenciada, as sequências das restantes máquinas são reajustadas, tendo em conta as novas circunstâncias do problema (Adams, Balas e Zawack 1988; Pinedo 2008).

2.6.3 Análise crítica

Na literatura é possível encontrar uma diversidade de estudos e considerações relativos à resolução de JSSP. Além das abordagens descritas anteriormente, existem muitas outras com particularidades e parâmetros específicos da situação ou estudo que lhes deu origem.

A adequabilidade de tais modelos a situações práticas não é, contudo, uma garantia. Apesar de proporcionarem muitas e importantes considerações, os modelos da literatura não garantem, por si só, a resolução dos reais problemas da indústria. Estes devem ser estudados ao detalhe, por forma a ser possível determinar quais as verdadeiras restrições e variáveis em causa. Só após esta análise é possível definir com rigor o problema e modelar uma forma de o resolver. Os contributos da literatura fornecem, acima de tudo, linhas de orientação, que permitem fundamentar as estratégias de resolução a construir. Além disso, a envolvente tecnológica que rodeou esses trabalhos é bastante diferente da existente hoje em dia.

Com a evolução da capacidade de cálculo dos computadores, dos *softwares* de otimização e *hardwares* disponíveis, é possível, nos dias de hoje, encontrar soluções ótimas num espaço de tempo reduzido, quando comparado com o de há uns anos atrás. No entanto, esses mecanismos têm custos elevados, difíceis de suportar pela maioria das empresas de pequena e média dimensão. Daí a importância dos métodos de aproximação que, fruto do seu baixo

⁹ Tempo necessário para o processamento de determinado conjunto de operações.

custo exigência computacional, são muitas vezes utilizados, quer em contexto industrial, quer em contexto académico (Figura 13).

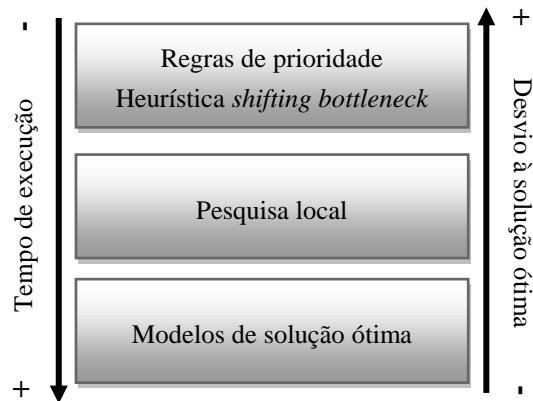


Figura 13 – Abordagens de resolução: qualidade da solução versus tempo de execução.

A análise às diferentes abordagens de resolução dos JSSP permite estabelecer uma relação entre a qualidade da solução e o tempo requerido para a obter. Apesar de não garantirem a solução ótima, os métodos de aproximação têm um tempo de execução razoável, podem ser utilizados em conjunto com outros métodos e mostram aderência a uma grande parte dos problemas reais.

3 Descrição do problema

O planeamento da produção na KTK assenta na calendarização do processamento de um conjunto de ordens de fabrico. Apesar das ordens de fabrico utilizadas na empresa incluírem todas as operações a realizar numa dada série de peças (desde a receção até à expedição), o planeamento da produção foca-se na calendarização das operações de maquinação de peças. Esta função de planeamento é um processo de tomada de decisão de nível operacional, que se foca essencialmente no curto prazo (Figura 14).

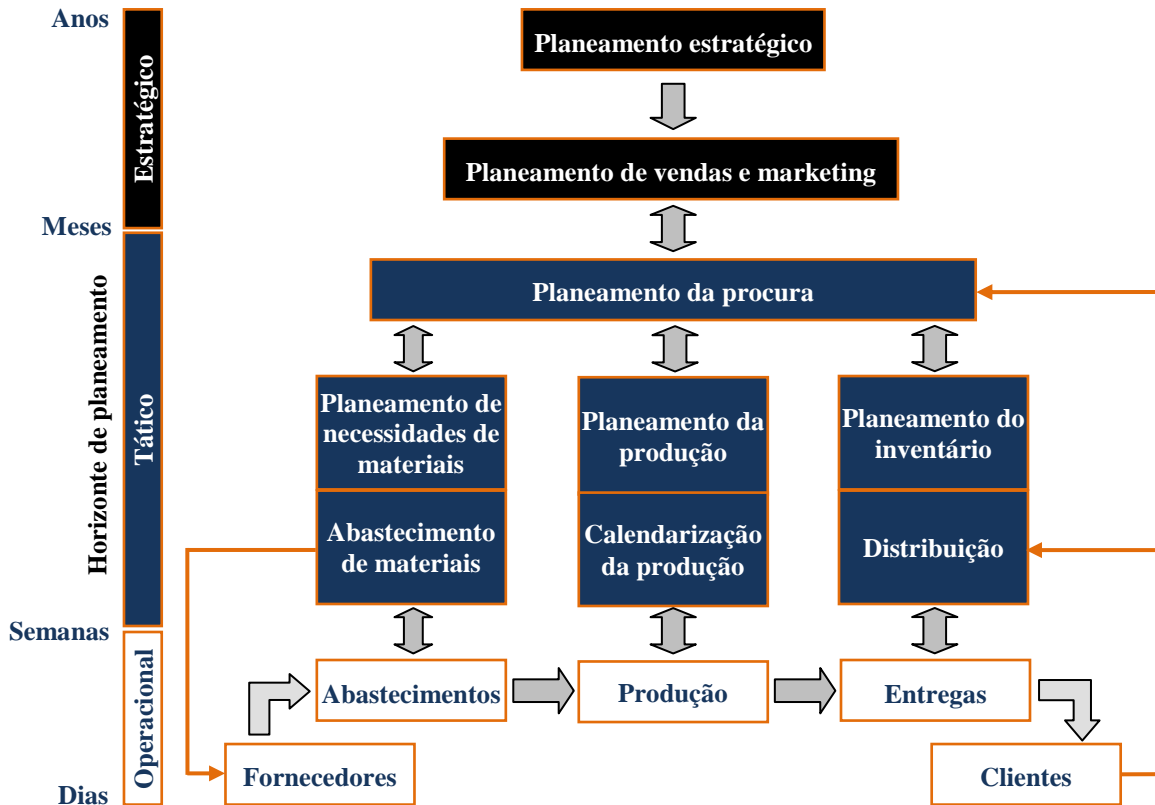


Figura 14 – Níveis de planeamento (adaptado de Guedes (2006)).

Para efeitos de planeamento da produção, a KTK considera que as máquinas constituem o recurso mais escasso. A fase de maquinação é, por isso, a primeira a ser planeada. Faz-se em seguida, e em função do planeamento das operações de maquinação, o planeamento das etapas de acabamento, inspeção de qualidade e embalagem/expedição, que são essencialmente manuais. O planeamento destas etapas consiste, essencialmente, na alocação de recursos humanos e numa priorização das ordens de fabrico em circulação, em função do prazo de entrega. A própria alocação de operadores para as diversas máquinas, tal como o agendamento das diversas movimentações de material entre e para estas, é realizada após a calendarização das operações. Daí o pressuposto apresentado na secção 2.1, que refere que a capacidade das máquinas é o único recurso limitado. Isto justifica o facto da prioridade dada ao planeamento das operações de maquinação.

A grande diferença entre o planeamento da produção da KTK e alguns dos JSSP abordados na literatura reside no facto de não haver qualquer relação entre o número de operações de maquinação por ordem de fabrico e o número de máquinas. Em diversos JSSP genéricos pressupõe-se que as ordens de fabrico visitam todas as máquinas uma vez. Tais pressupostos

garantem que as diversas ordens de fabrico têm um número de operações constante e igual ao número de máquinas, o que não se verifica na KTK.

Neste capítulo é apresentado com detalhe o problema abordado neste projeto. Numa primeira fase é analisada a estrutura das ordens de fabrico em circulação na KTK, bem como algumas considerações sobre os tempos de *setup*. É também exposto com pormenor o modo como os calendários da produção são gerados, bem como o modo como o seu desempenho é avaliado.

3.1 Ordens de fabrico

As ordens de fabrico são um documento chave para o desenrolar do fluxo produtivo. Estas permitem aferir qual a sequência de operações que dará origem ao produto final pretendido, para uma dada série de peças. Nela constam várias informações acerca do cliente, do material utilizado e das diversas operações de maquinação. Na Figura 15 é possível visualizar a primeira página de uma ordem de fabrico, na qual é registado o controlo da entrada do material. Na página frontal desse documento, e para além da identificação da ordem de fabrico, é indicada a quantidade a produzir e da data devida de entrega na página frontal do referido documento.

Identificação → Nº OF 1147

Prazo → 11-10-2013

Quantidade → 30

Qtz. Encomendada: 30

Materia-prima: ALUMINIO LIGA 7075 ESPESURA 25MM

Nº de Lote MP: 129-2013010392.001

Observações Gerais: V2: GEOMETRIA IGUAL A V1 (APENAS ATUALIZAÇÃO DE GAMA DE FABRICO)

Documentos Aplicáveis: C23211-A3-C3-7-8, TL 23211-A3-C3-7-25/02

CONTROLO ENTRADA MATÉRIA

LOTE MATÉRIA	FORNECEDOR	CC MATÉRIA	SI	NÃO			
RECEBIDO		ENCOMENDADO					
TIPO DE MATÉRIA							
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS	1 MIN 3	1 MAX 3	MIN	MAX			
	Re (R _e 0.2)		Re (R _e 0.2)				
	OUTRAS		OUTRAS				
ESPESSURA		LARGURA	COMPRIMENTO	ESPESSURA		LARGURA	COMPRIMENTO
DIMENSÕES							
QUANTIDADE							

RECEBIDO POR _____ DATA _____

ANÁLISE ENTRADA MATÉRIA
(Análise Controlo Método)

DEVIACÃO	SI	NÃO	DEVIACÃO MP
NÃO CONFORMIDADES	SI	NÃO	Nº FICHA DE NÃO CONFORMIDADE
DESCRIÇÃO			
VERIFICADO POR _____		DATA _____	

Figura 15 – Página frontal de uma ordem de fabrico.

A cada operação que compõe o roteiro de fabrico, é atribuído um espaço na referida ordem de fabrico, no qual constam dados sobre a sua realização. A máquina onde a operação ocorre e a duração do seu processamento são exemplos de informações aí presentes (Figura 16). Há ainda campos em branco para serem preenchidos pelos colaboradores afetos à operação, onde é registada a quantidade de peças conformes e não conformes produzidas.

The image shows a production order form with the following structure:

- Top Section:** 'ORDEM DE FABRICO: QF1147' and 'REFERÊNCIA: [redacted]'. A barcode is present.
- Work Center CM01:** 'Centro Trabalho: AR01', 'Fase / Operação: (0) BASE DE ARMAZEN', 'Nº Programa: [redacted]', 'Tempo Prepar.: 10:00 Minutos', 'Tempo Operação: 0 Minutos', 'Conf.: 16', 'Rej.: -', 'Nome: [redacted]', 'Data: 12/1/2013'.
- Work Center CM03 (highlighted):** 'Centro Trabalho: CM03', 'Fase / Operação: 10 MAQUINAGEM - EXECUÇÃO DE', 'Nº Programa: [redacted]', 'Tempo Prepar.: 10:00 Minutos', 'Tempo Operação: 22 Minutos', 'Conf.: 14', 'Rej.: -', 'Nome: [redacted]', 'Data: 21-1-2013'. This section is annotated with 'Máquina' and 'Duração'.
- Work Center CM06:** 'Centro Trabalho: CM06', 'Fase / Operação: 18 SETUP MAQUINAGEM A - Y DES', 'Nº Programa: [redacted]', 'Tempo Prepar.: 1:00:00 Minutos', 'Tempo Operação: 0 Minutos'.
- Additional Fields:** 'LIGA 7075-7631 - DIMENSÕES BLOCO 180X56X25 (2P)', 'ATENÇÃO - ESPESURA TTS: 3-5 mm (FACE INÁO É PARA COMPENSAR ESTE VALOR NA MAQUINAGEM)', and another 'ATENÇÃO' section at the bottom.

Figura 16 – Sequência de operações de uma ordem de fabrico.

Após o fim do fluxo produtivo (expedição ou armazenagem de produto acabado) a ordem de fabrico correspondente é fechada, sendo a informação constante nos campos preenchidos pelos colaboradores guardada para posterior tratamento e análise. As ordens de fabrico são assim um mecanismo de passagem de informação entre as diversas secções produtivas e não produtivas da empresa, acompanhando o material físico correspondente em todas as etapas da produção.

3.2 Tempos de setup

No atual modo de planeamento da produção na KTK, o tempo de processamento das diversas operações de maquinação é composto de forma indistinta pelo tempo de *setup*, pelo tempo de validação da primeira peça e pelo tempo de maquinação em série (Figura 17). Apesar de nas ordens de fabrico os tempos de *setup* virem quantificados de forma isolada, para efeitos de planeamento estes são tratados como fazendo parte das diversas operações de maquinação,

inviabilizando deste modo uma análise mais cuidada e refinada dos tempos improdutivo e dos calendários gerados.

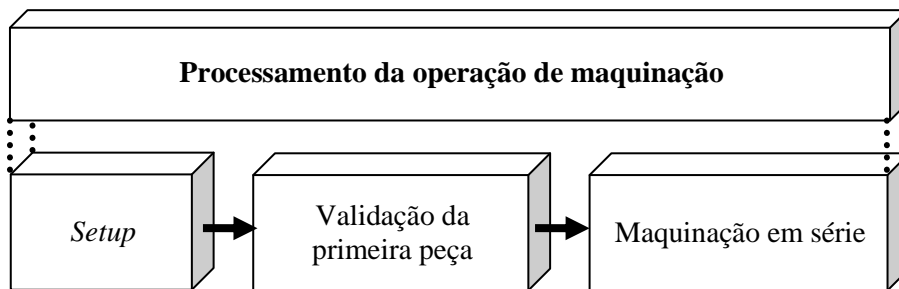


Figura 17 – Tempo de processamento das operações no atual modo de planeamento.

Nos modelos a desenvolver, o tempo de processamento das operações de maquinação não incluirá o tempo de *setup*. Resultará apenas da junção entre o tempo de validação da primeira peça e o tempo de maquinação em série (Figura 18). Considerar o tempo de validação da primeira peça como parte do tempo de processamento, e não como parte do tempo de *setup*, resulta de dois factos. Em primeiro lugar sabe-se que este procedimento de validação tem que ocorrer com a presença do material na secção de trabalho não podendo, por isso, haver sobreposição com outras operações da mesma ordem de fabrico. Por fim sabe-se que desta validação vai resultar uma peça, a primeira da série. Trata-se assim de um procedimento que resulta em produção, que apesar de ser unitária, é quantificada, registada e anexada à série.

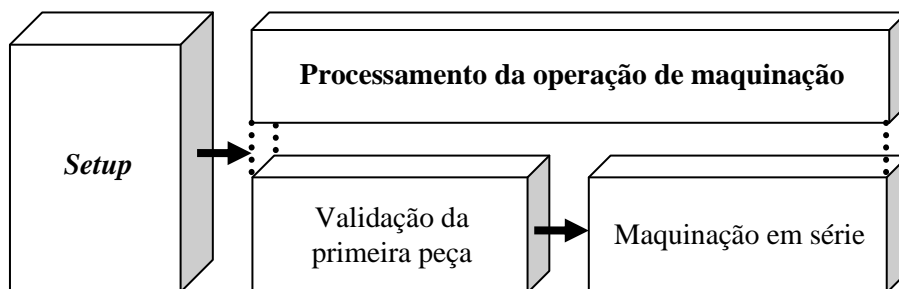


Figura 18 – Tempo de processamento das operações a considerar nos modelos.

Tratando-se a KTK de uma empresa que se dedica ao fabrico de pequenas séries, numa lógica de fabrico orientado ao cliente, na qual os *setups* impõem a sua presença, quer pela frequência de ocorrência, quer pela sua dimensão, as considerações da Figura 17 podem tornar a análise ao tempo improdutivo pouco precisa e simplista face à realidade. De facto, se aos tempos de *setup* forem associados custos, nomeadamente custos de perdas de produção, aconselha-se um tratamento isolado destes, tal como exibido na Figura 18, pois permite que o processo de tomada de decisão seja feito com um nível de confiança superior.

Para efeitos de planeamento, na KTK os tempos de *setup* não são considerados como sendo dependentes da sequência. Apesar de teoricamente ser possível estimá-los pelo número de ferramentas que permanecem nas máquinas entre operações consecutivas, a ponderação de todas as possibilidades de consecutividade de operações não deixa de ser uma tarefa morosa e complexa. Dado o considerável número de ordens de fabrico em circulação a cada instante de tempo, a análise de todas as combinações exige tempo e conhecimento do terreno.

3.3 Criação dos calendários

Para a recolha e disponibilização de informação, bem como um elevado nível de integração da mesma, a KTK utiliza, no decurso da sua atividade operacional, um ERP. Apesar deste

sistema de informação incorporar um módulo de planeamento, apenas as atividades de gestão das necessidades de matéria-prima e de rastreabilidade¹⁰ ascendente e descendente do produto são realizadas com o seu suporte. O planeamento deste sistema não se encontra adequado ao processo e às rotinas produtivas, não sendo por isso utilizado para o planeamento da produção da KTK. Na Figura 19 mostra-se a arquitetura deste ERP.

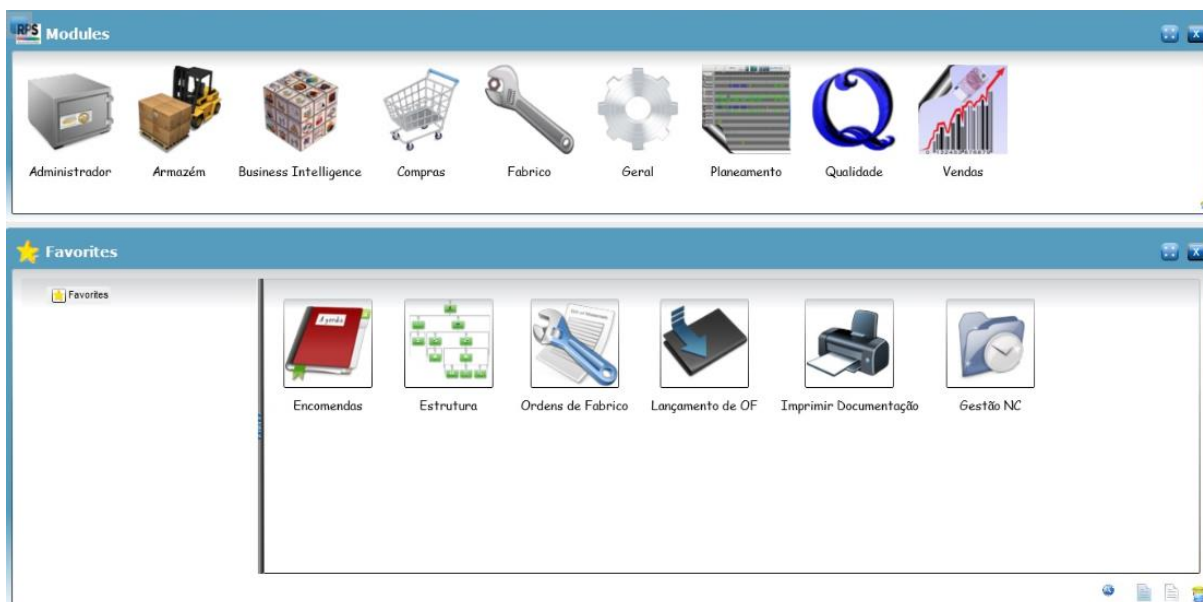


Figura 19 – Vista geral do ERP da empresa.

A geração de referências internas para a matéria-prima e o lançamento de ordens de fabrico são duas atividades desenvolvidas na KTK com o suporte do ERP. Já a calendarização das operações, que segundo Pinedo (2008) é feita frequentemente de forma interativa por intermédio de um sistema de decisão que está ligado a um sistema ERP, tem lugar na secção de apoio à produção da empresa e é feita de forma relativamente desintegrada deste sistema de informação.

Os calendários são pensados de forma essencialmente “manual”, não havendo por isso mecanismos diretos de controlo, monitorização e avaliação, mediante eventuais critérios de desempenho pretendidos. O ERP funciona apenas como suporte, servindo de base de dados das diversas ordens de fabrico, operações e *setups*.

O planeamento é feito com o suporte do *Office Excel*. Para cada evento é criada uma folha de cálculo com os dados quantitativos e qualitativos relativos às ordens de fabrico a processar. Nela constam todas as informações necessárias ao planeamento, tal como a Figura 20 mostra.

Os dados estão organizados na folha de cálculo por colunas, sendo que a cada linha de dados corresponde uma operação de uma dada ordem de fabrico. O mecanismo de filtros instalado no cabeçalho da tabela permite apenas mostrar os dados relativos, por exemplo, a uma máquina ou ordem de fabrico, sendo bastante útil para instâncias com muitos dados. À direita dos dados relativos às ordens de fabrico situam-se os dias inseridos no horizonte de planeamento. Cada dia é representado por uma coluna, sendo feita uma divisão semanal para facilitar o agente de planeamento.

¹⁰Capacidade de saber onde é que um dado produto se encontra ao longo da sua cadeia produtiva/logística.

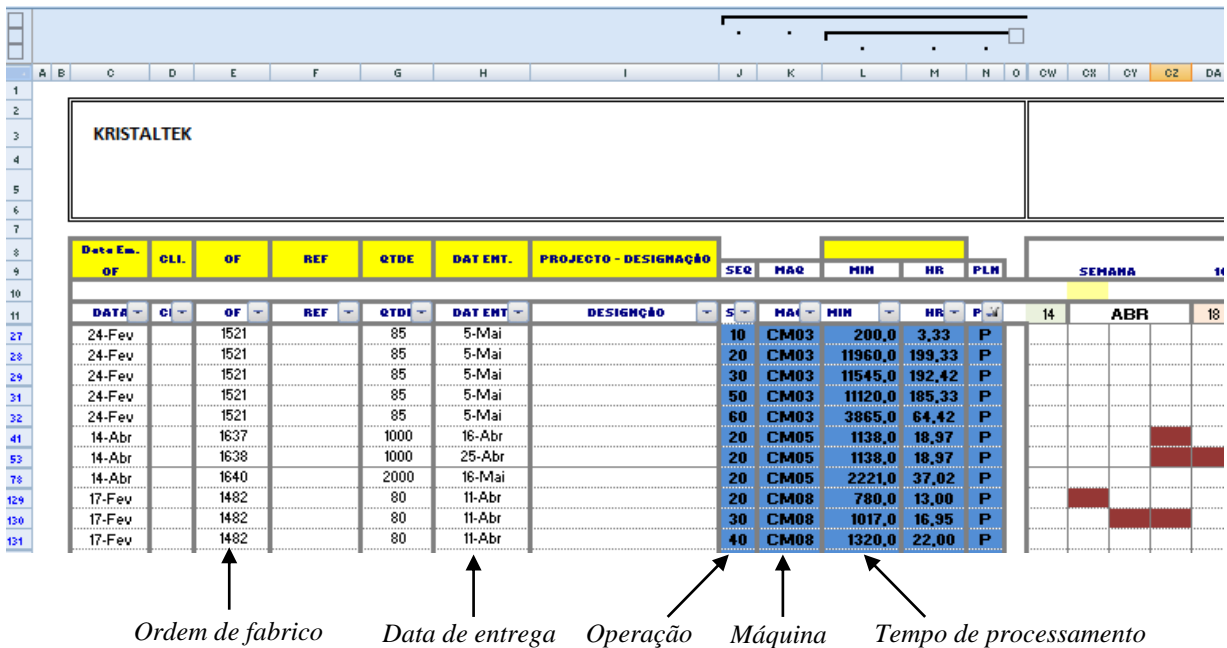


Figura 20 – Recorte de uma folha de cálculo de planeamento da empresa.

Caso uma operação seja processada em determinado dia, a célula correspondente (a linha corresponde à operação; a coluna corresponde ao dia) é preenchida a vermelho. Caso um dia não baste para processar uma operação, é necessário associar a operação a diversos dias, preenchendo várias células vizinhas na mesma linha. As colunas relativas a dias que não sejam dias úteis para a empresa são preenchidas a cor-de-rosa. Na Figura 21, além de se ilustrar a alocação de operações, mostra-se o modo como é frequentemente inserido no sistema o tempo de processamento das operações (soma do tempo de *setup*, de validação da primeira peça e de maquinação em série).

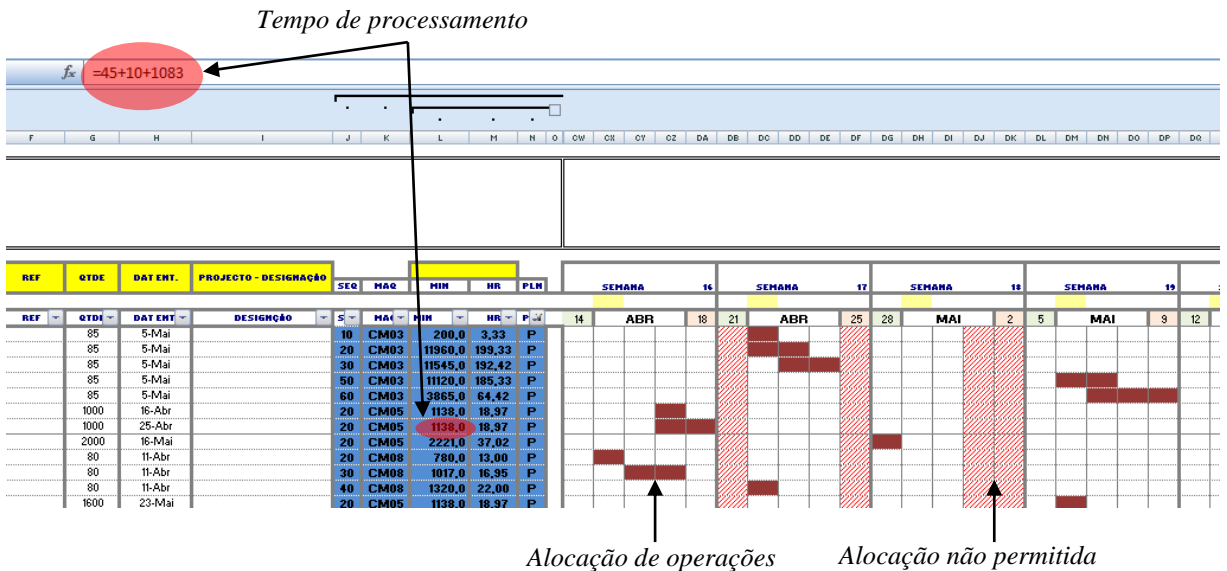


Figura 21 – Recorte de uma folha de cálculo evidenciando a alocação de operações.

O mecanismo de alocação das operações aos diversos dias tem por base um critério baseado na data devida de entrega. As operações são alocadas de forma manual, por forma a garantir uma folga, entre a data devida de entrega e a data de conclusão da maquinação, que seja suficiente para finalizar as operações da ordem de fabrico (acabamento de superfície, inspeção de qualidade e embalagem/expedição).

Apesar das diversas operações de maquinação ficarem com o dia de processamento definido, este mecanismo de planeamento não determina, por si só, a hora de início do processamento. Dadas as especificidades deste tipo de produção, diversos fatores esporádicos, não previsíveis à data do planeamento, podem fazer alterar o normal fluxo produtivo (desacerto da máquina, desgaste de ferramentas, substituição de elementos de fixação, entre outros). A própria duração da operação de maquinação em série, que normalmente é extrapolada por defeito a partir do tempo de ciclo unitário, não permite aferir com grande precisão o tempo real de produção em série.

Com este tipo de planeamento, em que se faz uma alocação das operações ao dia/turno e não à hora/minuto, torna-se difícil fazer um balanceamento entre a carga e capacidade disponível para as máquinas. A própria restrição da não sobreposição de operações da mesma ordem de fabrico pode ficar comprometida, quando duas operações consecutivas são feitas em máquinas diferentes. Apesar do mecanismo de filtros presente na folha de cálculo facilitar essa análise, verificar se as restrições tecnológicas são ou não cumpridas torna-se difícil, dado o desconhecimento da hora de início de processamento das diversas operações.

Este método de planeamento, para além de dificultar a obtenção de indicadores de desempenho associados aos calendários gerados, pode fazer com que eventuais possibilidades de calendarização viáveis não sejam consideradas, quer pela dificuldade da sua obtenção, quer pelos calendários (ou parte deles) pré-concebidos pelo agente de planeamento, oriundos de eventos anteriores. Por oposição, ao carácter manual deste planeamento está associada a experiência acumulada e o *know-how* do agente, o que permite levar em consideração certas variáveis e fatores particulares de uma dada circunstância, algo não possível de definir antecipadamente.

O resultado dos eventos de planeamento é materializado com recurso a diagramas de Gantt (Figura 22). Para cada máquina é assim elaborado um diagrama, contendo informações acerca das operações e ordens de fabrico em causa, a realizar no período de tempo considerado.

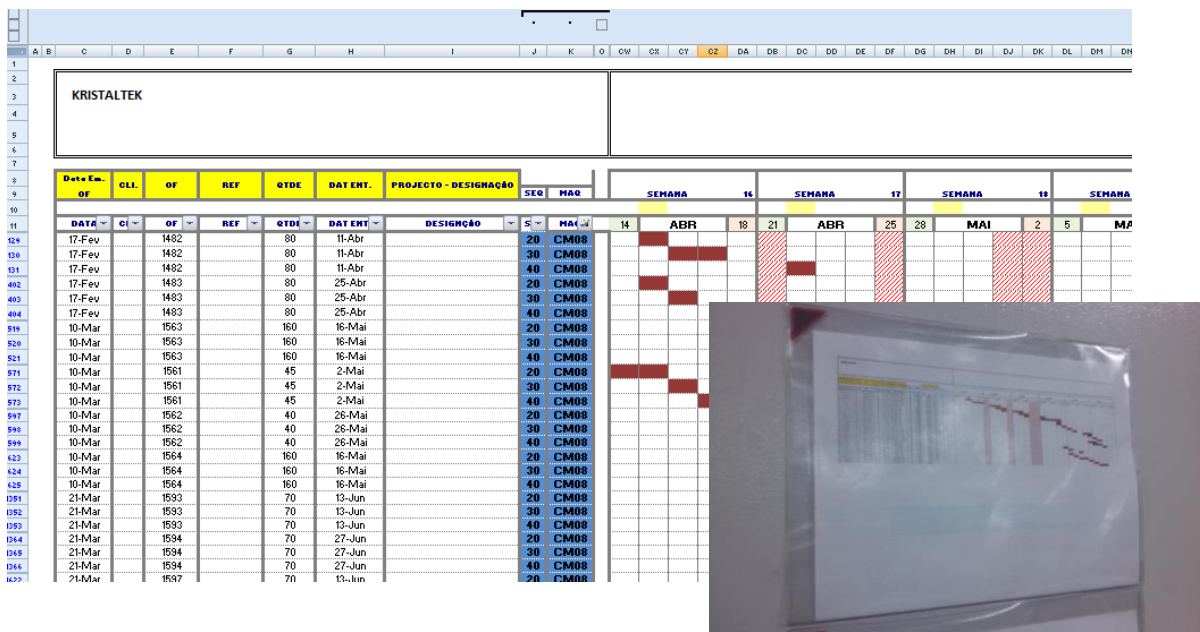


Figura 22 – Diagramas de Gantt gerados pelo planeamento da produção.

Estes diagramas são afixados nas respetivas máquinas, por forma a garantir a passagem de informação entre a secção de apoio à produção e os respetivos centros de trabalho, tal como exibido na figura anterior.

3.4 Avaliação do desempenho

Um dos fatores mais preponderantes para a medição do desempenho da atividade operacional da KTK é a data de entrega dos produtos. Dado o setor de atividade da KTK, em que os produtos são feitos de acordo com os requisitos dos clientes, e dado o atual balanceamento carga-capacidade, em que frequentemente se verifica uma supremacia da carga, a questão dos prazos e datas de entrega assume especial importância na definição do posicionamento da empresa perante os clientes. A própria missão da empresa, conforme se pode ver na Figura 1, refere a importância dos prazos de entrega como fator de competitividade.

Na KTK existe um mecanismo de medição do desempenho relativo à data de conclusão das diversas ordens de fabrico e ao nível de qualidade. Os dados oriundos das ordens de fabrico e de folhas de registo de não conformidades são tratados em folhas de cálculo do *Office Excel*, garantindo desta forma o cálculo dos indicadores pretendidos (Figura 23).

6																			0,28%		
7	GERAL	OBJECTIVO	Actual	Fora Objec.															Devoluções a 6 meses		
8	OTD	>85%	97,54%	0,00%															0,28%		
9	OQ 12 MESES	>99%	99,72%	0,28%															Devoluções a 3 meses		
10	OQ 6 MESES	>99%	99,72%	0,28%															0,02%		
11	OQ 3 MESES	>99%	99,98%	0,02%																	
12																					
13																					
14	MÊS	Nº Linhas	Nº peças	Em atraso	Distribuição por dias de atraso				Devoluções		Distribuição por dias de atraso %										
15	JANEIRO	101	18251	3	2,97%	0 < D < 5	5 < D < 10	10 < D < 20	> 20	Qtz peças	%	0 < D < 5	5 < D < 10	10 < D < 20	> 20						
16	FEVEREIRO	94	21972	3	3,19%	3	0	0	0	238	1,30%	2,97%	0,00%	0,00%	0,00%						
17	MARÇO	106	25266	1	0,94%	1	0	2	0	89	0,41%	1,06%	0,00%	2,13%	0,00%						
18	ABRIL	78	28065	2	2,56%	0	0	0	2	1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	2,56%						
19	MAIO	69	29282	2	2,90%	2	0	0	0	0	0,00%	2,90%	0,00%	0,00%	0,00%						
20	JUNHO	0	0	0	0,00%	0	0	0	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%						
21	JULHO	0	0	0	0,00%	0	0	0	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%						
22	AGOSTO	0	0	0	0,00%	0	0	0	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%						
23	SETEMBRO	0	0	0	0,00%	0	0	0	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%						
24	OUTUBRO	0	0	0	0,00%	0	0	0	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%						
25	NOVEMBRO	0	0	0	0,00%	0	0	0	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%						
26	DEZEMBRO	0	0	0	0,00%	0	0	0	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%						
27																					
28	TOTAL	448	122836	11	2,46%	6	0	3	2	341	0,28%	1,34%	0,00%	0,67%	0,45%						

Figura 23 – Recorte de uma folha de cálculo de tratamento de indicadores.

Os indicadores de desempenho relativos às datas de entrega são, de entre os atualmente em vigor, são os mais importantes para efeitos de planeamento da produção. Existe um indicador geral, o OTD (*On Time Delivery*), que indica a percentagem de ordens de fabrico entregues ao cliente dentro do prazo. Existe também um registo discriminado dos diversos atrasos consoante o seu valor. Além de se registar o número absoluto e relativo de ordens de fabrico atrasadas num dado mês de forma global, esses mesmos dados são registados de forma diferenciada pelo tamanho do atraso. A dimensão do atraso é tratada de forma contínua, sendo utilizadas classes com um intervalo mínimo de cinco dias de atraso.

Por forma a avaliar o desempenho dos calendários gerados, será utilizado um critério baseado nas datas de conclusão das ordens de fabrico. Os modelos a desenvolver serão sustentados por regras que remetem essencialmente para as datas devidas de entrega, para as datas efetivas de conclusão e para os atrasos verificados.

A satisfação dos clientes é algo que se mede, não só através da conformidade dos produtos, mas também pelo cumprimento dos prazos de entrega. A entrega não atempada dos produtos, além de corresponder a um desempenho deficitário numa das competências definidas pela KTK, pode significar uma quebra no nível de satisfação dos clientes.

4 Modelos propostos

Neste capítulo é apresentada a solução desenvolvida para o problema estudado. A primeira secção contém uma listagem da nomenclatura adotada para os diversos atributos, parâmetros e variáveis. Em seguida é feita uma descrição detalhada do modelo matemático construído para representar o problema. Para além deste modelo, foi implementado um modelo heurístico de forma a se poder obter soluções exequíveis satisfatórias em tempo razoável. Este permite alcançar boas soluções, apesar de não serem ótimas, em tempo adequado, para instâncias de dados de dimensão real. Os procedimentos, rotinas e avaliadores de desempenho desta abordagem são descritos na última secção deste capítulo.

4.1 Nomenclatura e parâmetros

Para garantir um grau desejável de uniformidade e coerência, foi criada uma nomenclatura para identificação dos diversos parâmetros e variáveis utilizados ao longo dos modelos. Estes parâmetros e variáveis são frequentemente utilizados associados a índices, utilizando-se para tal a notação da Tabela 2.

Tabela 2 – Índices dos modelos.

Índice	Atributo do problema
j	Ordem de fabrico
i	Operação
k	Máquina

Considere-se a operação $O_{i,j}$ como sendo a i -ésima operação da ordem de fabrico j . Todas as operações têm associados os seguintes parâmetros:

- $p_{i,j}$ duração do processamento da operação $O_{i,j}$;
 $m_{i,j}$ máquina em que a operação $O_{i,j}$ é processada.

As ordens de fabrico, por sua vez, têm associados os seguintes parâmetros:

- n_j número de operações da ordem de fabrico j ;
 D_j data devida de entrega¹¹ da ordem de fabrico j ;
 r_j data mínima de início de processamento da ordem de fabrico j .

Quanto aos *setups*, e sabendo que estes dependem da sequência de operações a realizar numa dada máquina, salientam-se os seguintes parâmetros:

- s_{i_1,j_1,i_2,j_2} tempo de *setup* a realizar entre a operação O_{i_1,j_1} e a operação O_{i_2,j_2} ;
 $s_{i,j}$ tempo de *setup* inicial se a operação $O_{i,j}$ for a primeira a realizar na máquina $m_{i,j}$;
 $s_j = \begin{cases} 1 & \text{se a ordem da fabrico } j \text{ permite sobreposição de } \textit{setups} \text{ com operações;} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

¹¹Visto o modelo contemplar apenas o planeamento das operações de maquinação, considera-se como data devida de entrega o prazo final de entrega ao cliente subtraído do tempo estimado necessário às operações e *setups* a realizar após as operações de maquinação. Na prática, a data devida de entrega em causa consiste na data devida de entrega estimada das operações de maquinação à entidade a jusante.

Relativamente ao atributo máquina, considere-se o seguinte parâmetro:

d_k data da disponibilidade inicial da máquina k .

Para finalizar resta referir os parâmetros gerais do modelo de planeamento:

N conjunto das ordens de fabrico;

M conjunto das máquinas;

L constante de valor muito elevado.

São estes os parâmetros e as variáveis que servem de base à formulação do modelo matemático, isto é, que permitem definir as variáveis de decisão, as restrições e a função objetivo do problema.

4.2 Modelo matemático de programação linear

4.2.1 Variáveis de decisão

As variáveis de decisão a seguir apresentadas, que apenas podem tomar valores não negativos, permitem aferir a hora de início das diversas operações, bem como a respetiva sequência das mesmas em cada uma das máquinas. São elas:

$h_{i,j}$ data de início do processamento da operação $O_{i,j}$;

$X_{i_1,j_1,i_2,j_2} = \begin{cases} 1 & \text{se a operação } O_{i_2,j_2} \text{ for realizada após a operação } O_{i_1,j_1}, \\ 0 & \text{caso contrário;} \end{cases}$

$Y_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{se a operação } O_{i,j} \text{ for a primeira a ser realizada na máquina } m_{i,j}, \\ 0 & \text{caso contrário;} \end{cases}$

$Z_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{se a operação } O_{i,j} \text{ for a última a ser realizada na máquina } m_{i,j}, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

O modelo proposto é então o seguinte:

$$\min \sum_{\forall j \in N} (T_j) = \min \sum_{\forall j \in N} (\max \{h_{n,j} + p_{n,j} - D_j; 0\}) \quad (4)$$

Sujeito a:

$$\forall j_2 \in N, \forall i_2 \in [1, \dots, n_{j_2}]$$

$$\sum_{\forall j_1 \in N} \sum_{\substack{\forall i_1 \in [1, \dots, n_{j_1}]: \\ m_{i_1,j_1} = m_{i_2,j_2}}} (Y_{i_2,j_2} + X_{i_1,j_1,i_2,j_2}) = 1 \quad (5)$$

$$\sum_{\forall j_1 \in N} \sum_{\substack{\forall i_1 \in [1, \dots, n_{j_1}]: \\ m_{i_1,j_1} = m_{i_2,j_2}}} (Z_{i_2,j_2} + X_{i_2,j_2,i_1,j_1}) = 1 \quad (6)$$

$$h_{i_2,j_2} \geq 0 \quad (7)$$

$$Y_{i_2, j_2} \in \{0,1\} \quad (8)$$

$$Z_{i_2, j_2} \in \{0,1\} \quad (9)$$

$$\forall j_1 \in N, \forall i_1 \in [2, \dots, n_{j_1}]: m_{i_1, j_1} \neq m_{i_1-1, j_1}$$

$$(1 - Y_{i_1, j_1}) \times \sum_{\forall j_2 \neq j_1 \in N} \sum_{\substack{\forall i_2 \in [1, \dots, n_{j_2}]: \\ m_{i_2, j_2} = m_{i_1, j_1}}} (X_{i_2, j_2, i_1, j_1} \times s_{i_2, j_2, i_1, j_1}) + Y_{i_1, j_1} \times s_{i_1, j_1} + h_{i_1-1, j_1} + \quad (10)$$

$$p_{i_1-1, j_1} \leq h_{i_1, j_1} + L \times s_{j_1}$$

$$\forall j \in N, \forall i \in [2, \dots, n_j]$$

$$h_{i-1, j} + p_{i-1, j} \leq h_{i, j} \quad (11)$$

$$\forall j_2 \in N$$

$$(1 - s_{j_2}) \times \left[(1 - Y_{1, j_2}) \times \sum_{\forall j_1 \neq j_2 \in N} \sum_{\substack{\forall i_1 \in [1, \dots, n_{j_1}]: \\ m_{i_1, j_1} = m_{1, j_2}}} (X_{i_1, j_1, 1, j_2} \times s_{i_1, j_1, 1, j_2}) + Y_{1, j_2} \times s_{1, j_2} \right] + \quad (12)$$

$$r_{j_2} \leq h_{1, j_2}$$

$$\forall j \in N, \forall i \in [1, \dots, n_j - 1]: m_{i, j} = m_{i+1, j}$$

$$X_{i, j, i+1, j} = 1 \quad (13)$$

$$\forall k \in M$$

$$\sum_{\forall j \in N} \sum_{\substack{\forall i \in [1, \dots, n_j]: \\ m_{i, j} = k}} (s_{i, j} \times Y_{i, j}) + d_k \leq \sum_{\forall j \in N} \sum_{\substack{\forall i \in [1, \dots, n_j]: \\ m_{i, j} = k}} (h_{i, j} \times Y_{i, j}) \quad (14)$$

$$\sum_{\forall j \in N} \sum_{\substack{\forall i \in [1, \dots, n_j]: \\ m_{i, j} = k}} (Y_{i, j}) = 1 \quad (15)$$

$$\sum_{\forall j \in N} \sum_{\substack{\forall i \in [1, \dots, n_j]: \\ m_{i, j} = k}} (Z_{i, j}) = 1 \quad (16)$$

$$\forall j_1, j_2 \in N, \forall i_1 \in [1, \dots, n_{j_1}], \forall i_2 \in [1, \dots, n_{j_2}]: m_{i_1, j_1} = m_{i_2, j_2}$$

$$h_{i_1, j_1} + p_{i_1, j_1} + s_{i_1, j_1, i_2, j_2} \leq h_{i_2, j_2} + L \times (1 - X_{i_1, j_1, i_2, j_2}) \quad (17)$$

$$\forall j_1, j_2 \in N, \forall i_1 \in [1, \dots, n_{j_1}], \forall i_2 \in [1, \dots, n_{j_2}]$$

$$X_{i_1, j_1, i_2, j_2} \in \{0, 1\} \quad (18)$$

4.2.2 Função objetivo

Para o modelo apresentado optou-se por uma função objetivo assente num critério baseado nas datas devidas de entrega das ordens de fabrico. O cumprimento dos prazos, sendo um fator importante para garantir a satisfação dos clientes, é um indicador chave para o controlo e monitorização da atividade operacional da empresa.

A KTK, em termos genéricos, não associa diretamente qualquer benefício ou custo ao facto de terminar uma dada ordem de fabrico antes da data devida de entrega (a eventual criação de *stock* de produto acabado é uma decisão estratégica). As penalizações ou bonificações baseadas no término antecipado das ordens de fabrico relativamente à data devida de entrega (*earliness* e *lateness*) deixam assim de fazer sentido.

Optou-se por isso pela minimização da soma dos atrasos (*tardiness*). Trata-se de um indicador baseado numa penalização a incorrer pelos atrasos na conclusão das várias ordens de fabrico relativamente às suas datas devidas de entrega (Figura 24).

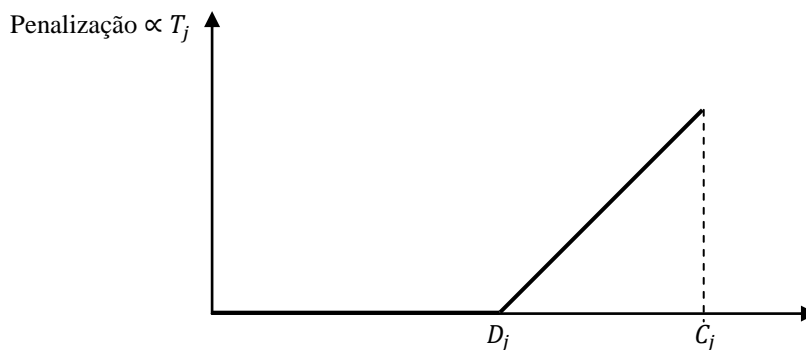


Figura 24 – Representação do atraso de uma dada ordem de fabrico j (adaptado de Pinedo (2008)).

Na resolução deste problema da empresa assume-se que a penalização a incorrer pelo atraso é proporcional à dimensão deste. Rajendran e Holthaus (1999) referem que é prática comum minimizar-se uma medida de desempenho baseada no atraso, em que a penalização a incorrer por este é diretamente proporcional ao período de tempo de atraso. Definiu-se assim como objetivo a minimizar a soma dos atrasos das ordens de fabrico (expressão (4)), visto ser um indicador que permite penalizar com magnitudes diferentes os atrasos de dimensão diferente e que engloba todas as ordens de fabrico. Em termos matemáticos, a minimização da soma dos atrasos equivale à minimização do atraso médio, pois o número de ordens de fabrico num dado evento de planeamento é constante.

Apesar da importância dos atrasos, qualquer outro avaliador de desempenho dos calendários pode ser utilizado como função objetivo do modelo matemático. A fórmula de cálculo de diversos indicadores de desempenho, relativos às ordens de fabrico ou às máquinas, é descrita na secção 4.4.5. Com estas fórmulas, é assim possível reformular a função objetivo consoante os dados e objetivos do momento. Caso se queiram conjugar dois ou mais avaliadores como objetivos a minimizar, pode inclusive ser definida uma função objetivo multicritério.

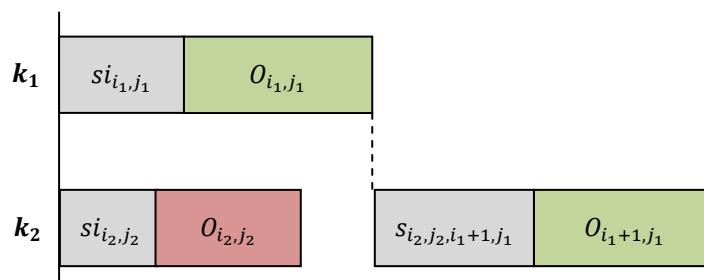
4.2.3 Restrições

As duas primeiras restrições apresentadas garantem a existência de apenas uma sequência de operações em cada máquina. A restrição (5) garante que cada operação, no caso de não ser a

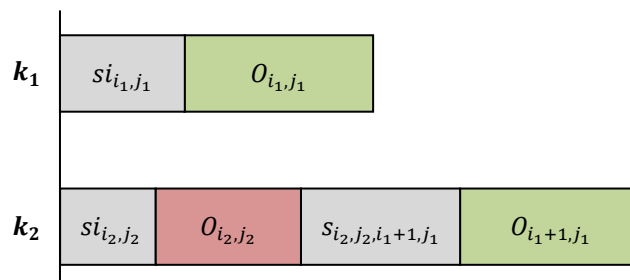
primeira a realizar na máquina, apenas tem uma outra operação antecedente. Por seu lado, a restrição (6) garante que cada operação, no caso de não ser a última a realizar na máquina, apenas tem uma outra operação subsequente.

A restrição (14) assegura que a primeira operação a realizar numa dada máquina apenas pode ter o seu início após a realização do *setup* inicial. Já este apenas pode ser realizado quando a máquina estiver disponível. As restantes operações, nessa mesma máquina, apenas podem ser realizadas após a hora de término da operação antecedente respetiva (*non preemption*), acrescida da duração do respetivo *setup*. Esta imposição, materializada através da restrição (17), garante a não sobreposição de operações e *setups* nas diversas máquinas.

A restrição (10) permite assegurar, caso seja imposto, que o *setup* de determinada operação apenas se inicia quando a respetiva operação já está em espera na máquina onde vai ser realizada. Tal situação está representada na Figura 25 (a). Nesta situação, quando há duas operações consecutivas de uma dada ordem de fabrico, a realizar em máquinas diferentes, o *setup* de preparação da máquina para a segunda operação, apenas pode ter início após o término da operação anterior correspondente à ordem de fabrico, apesar de esta ser realizada noutra máquina. Caso isto não seja imposto, tal como representado na Figura 25 (b), há apenas que garantir a normal sequência e não sobreposição de operações dentro das ordens de fabrico, tal como a restrição (11) indica (*overlapping* não permitido). A restrição (12) garante que as ordens de fabrico apenas se iniciam após a data mínima de início.



(a) – Situação em que $s_{j_1} = 0$.



(b) – Situação em que $s_{j_1} = 1$.

Figura 25 – Sobreposição de *setups* com operações para uma dada ordem de fabrico j_1 .

É importante assegurar que operações consecutivas de uma dada ordem de fabrico a realizar na mesma máquina sejam processadas na respetiva máquina sem a inclusão de uma operação de uma qualquer outra ordem de fabrico entre estas. Esta restrição, formulada com a equação (13), garante a possibilidade de processamento simultâneo de mais do que uma operação da mesma ordem de fabrico, situação passível de ocorrer sob determinadas circunstâncias. Esta última situação não é estabelecida, no entanto, por questões de planeamento da produção. Dependendo da tipologia das peças, do operador da máquina, do código de maquinação e dos tempos de ciclo das operações, pode dar-se o caso de serem maquinadas duas operações consecutivas da mesma ordem de fabrico de uma só vez. A ocorrência desta situação não é

conhecida à data do evento de planeamento, não podendo por isso ser considerada com a máxima precisão. Sabe-se, contudo, que a restrição (13) tem ligação à realidade produtiva da KTK. Quando duas operações consecutivas da mesma ordem de fabrico são realizadas na mesma máquina, pretende-se que as mesmas sejam realizadas consecutivamente na respetiva máquina. Com isto podem-se, eventualmente, eliminar movimentações e armazenamentos temporários de material na oficina, bem como de toda a documentação associada.

A própria matriz de *setups* construída para cada máquina terá que representar quais as sequências exequíveis de operações. Nas diversas matrizes apenas podem figurar valores para operações capazes de ocorrer uma após a outra. A ausência de qualquer valor reflete a impossibilidade de duas operações poderem ocorrer consecutivamente (Figura 26).

		Operação subsequente					
		O_{i_1,j_1}	O_{i_1+1,j_1}	O_{i_2,j_2}	O_{i_3,j_3}	O_{i_3+1,j_3}	O_{i_3+2,j_3}
Operação precedente	1^a	s_{i_1,j_1}		s_{i_2,j_2}	s_{i_3,j_3}		
	O_{i_1,j_1}		s_{i_1,j_1,i_1+1,j_1}				
	O_{i_1+1,j_1}			s_{i_1+1,j_1,i_2,j_2}	s_{i_1+1,j_1,i_3,j_3}		
	O_{i_2,j_2}	s_{i_2,j_2,i_1,j_1}			s_{i_2,j_2,i_3,j_3}		
	O_{i_3,j_3}					s_{i_3,j_3,i_3+1,j_3}	
	O_{i_3+1,j_3}						s_{i_3+1,j_3,i_3+2,j_3}
	O_{i_3+2,j_3}	s_{i_3+2,j_3,i_1,j_1}		s_{i_3+2,j_3,i_2,j_2}			

Figura 26 – Matriz de *setup* de uma dada máquina *k*.

De acordo com a representação anterior, sabe-se que a máquina *k* tem seis operações a realizar, pertencentes a 3 ordens de fabrico distintas. Os campos sem valor representados a verde impõem a realização consecutiva, na respetiva máquina, de operações consecutivas referentes à mesma ordem de fabrico – restrição (13). Já os campos sem valor sinalizados a vermelho impõem a normal sequência dentro da mesma ordem de fabrico – restrição (11). Referir que a primeira linha da matriz representa a primeira operação a realizar na máquina *k*.

Garante-se também que cada máquina tenha uma e uma só operação inicial – restrição (15) – e operação final – restrição (16). Isto permite evitar a consideração de operações fictícias correspondentes à primeira e à última operação a realizar em cada máquina. Assegura-se também a atribuição de valores não negativos à variável $h_{i,j}$ – restrição (7) – e que as variáveis $Y_{i,j}$, $Z_{i,j}$ e X_{i_1,j_1,i_2,j_2} se comportam como variáveis binárias – restrições (8), (9) e (18) respetivamente.

4.3 Consecutividade de eventos de planeamento

É necessário garantir que, aquando de um novo evento de planeamento, o planeamento feito até à data não seja totalmente desprezado. O modelo apresentado está precavido para tal

situação, bastando apenas quantificar certas variáveis na instância de dados. A Figura 27, que ilustra dois eventos de planeamento consecutivos, mostra como o preenchimento dos dados permite uma correta passagem de informação entre eventos de planeamento consecutivos.

As operações já iniciadas aquando do novo evento de planeamento não devem ser interrompidas (*non-preemption*), tal como ilustradas para a máquina k_2 . A disponibilidade inicial dessa máquina no novo evento de planeamento deve contemplar o tempo necessário para a sua conclusão. As operações já planeadas no primeiro evento e que não foram fixadas para o evento atual (operações remanescentes) estão em pé de igualdade com as novas operações (novas ordens de fabrico) inseridas no sistema para um novo evento de planeamento. Neste caso, é necessário atualizar (redefinir) os índices das operações (i) e das ordens de fabrico (j) que permanecem em circulação.

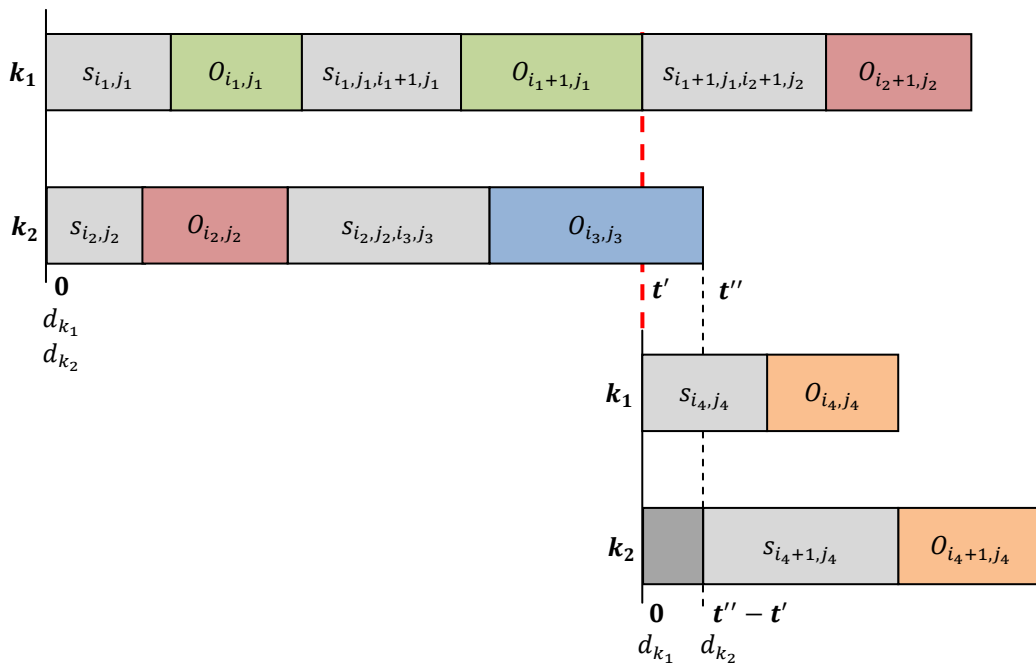


Figura 27 – Consecutividade de eventos de planeamento.

Os tempos de *setup* considerando que as operações são as primeiras a realizar na máquina (primeira linha da matriz – Figura 26), são, na prática, tempos de *setup* entre duas operações, sendo a precedente conhecida. O modelo tratá-los-á como sendo *setups* iniciais, sendo os seus valores já inseridos na instância de dados tendo conhecimento da operação prévia (fora do evento de planeamento). Pode dar-se o caso de a disponibilidade inicial, d_k , ser ditada, não por operações em curso, mas por indisponibilidade técnica (avaria), ações de manutenção, limpeza, entre outros. Nesse caso, o *setup* inicial estipulado terá que ter esse facto em consideração. Cabe ao agente de planeamento fazer um levantamento atento dos dados, e posterior inserção e tratamento dos mesmos no modelo, por forma a garantir um correto e eficaz evento de planeamento.

4.4 Modelo heurístico

A determinação de uma solução ótima para o modelo matemático apresentado na secção 4.2 obrigaria à utilização de *software* comercial de otimização que a KTK não dispõe, e cujo custo é elevado. Por esse motivo optou-se por propor uma abordagem heurística baseada em regras de prioridade. Quando comparada com outras estratégias construtivas, a resolução através de regras de prioridade revela-se menos complexa e de maior aplicabilidade prática. Esta abordagem, apesar de teoricamente não permitir o alcance da solução ótima, garante a

criação de calendários produtivos num intervalo de tempo muito reduzido, o que por si só, já compensa um eventual desvio da solução face ao seu valor ótimo. Foram incorporadas 7 regras de prioridade no sistema de apoio à decisão desenvolvido.

O algoritmo de sequenciamento de operações construído, que está apresentado na secção 4.4.2, permite sequenciar e calendarizar todas as operações de um conjunto de ordens de fabrico. Sempre que é necessário proceder à seleção de uma operação na fila de espera de uma determinada máquina, este algoritmo recorre ao método de seleção da próxima operação, que está apresentado em pormenor na secção 4.4.3. Para proceder à calendarização efetiva das operações, ou seja, à definição da sua hora de início de processamento, este algoritmo recorre ao algoritmo de calendarização de operações, que está descrito na secção 4.4.4. O algoritmo de sequenciamento de operações funciona como a principal rotina do modelo heurístico proposto, enquanto que o método de seleção da próxima operação e o algoritmo de calendarização de operações assumem o papel de sub-rotinas.

Nesta secção expõe-se pormenorizadamente a heurística desenvolvida, através de uma descrição detalhada das suas variáveis e rotinas, bem como da sua inter-relação. No final, é ainda apresentada a fórmula de cálculo dos avaliadores de desempenho dos calendários.

4.4.1 Nomenclatura

De seguida são definidos algumas variáveis e conjuntos de operações que, juntamente com os parâmetros apresentados na secção 4.1, permitem a definição do modelo heurístico.

Relativamente às máquinas, considerem-se os seguintes conjuntos de operações e variáveis:

Ω_k	conjunto de operações já sequenciadas na máquina k ;
$\bar{\Omega}_k$	conjunto de operações em fila de espera na máquina k ;
$\bar{\Omega}'_k$	conjunto de operações a ser adicionadas à fila de espera da máquina k ;
t_k	data em que a máquina k fica livre;
O_{i_k, j_k}^*	última operação calendarizada na máquina k até ao instante considerado;
α_k	$= \begin{cases} 1 & \text{se a máquina } k \text{ ainda não tem nenhuma operação calendarizada,} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

Considerem-se as seguintes variáveis relativas às operações:

$r_{i,j}$	data a partir da qual a operação $O_{i,j}$ está disponível para processamento;
O_{i^*, j^*}	operação a calendarizar no instante considerado;
$t_{i,j}$	data mínima de início do processamento da operação $O_{i,j}$.

Quanto aos *setups*, considerem-se as seguintes variáveis:

$T_{i,j}$	$= \begin{cases} 1 & \text{se o } \textit{setup} \textit{ } S_{i,j} \textit{ } \text{ ainda pode ser realizado,} \\ 0 & \text{caso contrário;} \end{cases}$
T_{i_1, j_1, i_2, j_2}	$= \begin{cases} 1 & \text{se o } \textit{setup} \textit{ } S_{i_1, j_1, i_2, j_2} \textit{ } \text{ ainda pode ser realizado,} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

As variáveis auxiliares $T_{i,j}$ e T_{i_1, j_1, i_2, j_2} permitem identificar, em qualquer instante do processo de sequenciamento, quais as possibilidades de consecutividade entre operações, bem como a possibilidade de uma operação ser a primeira a processar respetiva máquina. Na fase inicial do processo de planeamento, estas variáveis devem estar em concordância com a matrizes de

setup, pois as variáveis $T_{i,j}$ e T_{i_1,j_1,i_2,j_2} têm correspondência com os parâmetros $s_{i,j}$ e s_{i_1,j_1,i_2,j_2} respetivamente. Os campos sem valor da matriz de *setup* (representados na Figura 26 a verde, vermelho e cinzento) devem corresponder a variáveis $T_{i,j}$ e T_{i_1,j_1,i_2,j_2} de valor 0. Já os campos com valor da matriz devem corresponder a variáveis $T_{i,j}$ e T_{i_1,j_1,i_2,j_2} de valor 1.

Considerem-se ainda as seguintes variáveis genéricas:

- t data do instante de sequenciamento (data do relógio);
 t^* data do instante de sequenciamento anterior;
 γ tempo acumulado entre operações consecutivas¹² a realizar na mesma máquina;
 $\beta = \begin{cases} 1 & \text{se existem operações consecutivas}^{12} \text{ a realizar na máquina,} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

Com o desenrolar do algoritmo, as variáveis $T_{i,j}$ e T_{i_1,j_1,i_2,j_2} vão sendo redefinidas à medida que as possibilidades de consecutividade entre operações se tornam inexecutáveis. As variáveis em causa passam a assumir o valor 0 em vez do valor 1. No final do processo de planeamento apenas têm valor 1 as variáveis $T_{i,j}$ e T_{i_1,j_1,i_2,j_2} que representam respetiva e efetivamente a primeira operação a realizar na máquina e a consecutividade entre operações. Após o processo estar concluído, é possível fazer um paralelo entre as variáveis $T_{i,j}$ e T_{i_1,j_1,i_2,j_2} as variáveis de decisão do modelo matemático $Y_{i,j}$ e X_{i_1,j_1,i_2,j_2} respetivamente, pois representam o mesmo.

Nas secções 4.4.2 e 4.4.4, além dos algoritmos propostos serem descritos passo a passo, são também apresentados em forma de *flowchart*. Os processos de definição inicial e redefinição das variáveis $T_{i,j}$ e T_{i_1,j_1,i_2,j_2} pertencentes ao algoritmo de sequenciamento de operações e ao algoritmo de calendarização de operações respetivamente, são tratados como rotinas auxiliares e, por questões de simplificação, apenas são exibidos pela via gráfica. Na secção 4.4.3 detalha-se o método de seleção da próxima operação.

¹²Operações consecutivas na respetiva ordem de fabrico.

4.4.2 Algoritmo de sequenciamento de operações

i. Inicializar:

(a) definir os conjuntos Ω_k e $\bar{\Omega}_k$:

$$\Omega_k = \bar{\Omega}_k = \emptyset, \forall k \in M \quad (19)$$

(b) definir as variáveis t_k e α_k :

$$t_k = d_k, \forall k \in M \quad (20)$$

$$\alpha_k = 0, \forall k \in M \quad (21)$$

(c) definir as variáveis $T_{i,j}$ e T_{i_1,j_1,i_2,j_2} (ver Figura 29)

(d) criar as operações iniciais das ordens de fabrico nas filas de espera:

$$r_{1,j} = r_j, \forall j \in N \quad (22)$$

$$\bar{\Omega}_{m_{1,j}} = \bar{\Omega}_{m_{1,j}} \cup \{O_{1,j}\}, \forall j \in N \quad (23)$$

(e) definir a variável t :

$$t = \max\left\{\min\{t_k\}; \min\{r_j\}\right\} \quad (24)$$

$k \in M \qquad j \in N$

ii. Verificar as filas de espera:

Se $\cup_{k \in M}(\bar{\Omega}_k) \neq \emptyset$ seguir, caso contrário seguir para o passo iv.

iii. Sequenciar as operações:

(a) atualizar os conjuntos $\bar{\Omega}'_k$:

$$\bar{\Omega}'_k = \emptyset, \forall k \in M \quad (25)$$

(b) iniciar o ciclo para as máquinas:

$$k = 1 \quad (26)$$

(c) se $k \notin M$ seguir, caso contrário ir para o passo (f);

(d) redefinir as variáveis t e t^* e atualizar o conjunto $\bar{\Omega}_k$:

$$t^* = t \quad (27)$$

$$t = \min\{t_k\}_{t_k > t^*} \quad (28)$$

$$\bar{\Omega}_k = \bar{\Omega}_k \cup \bar{\Omega}'_k, \forall k \in M \quad (29)$$

(e) retornar ao passo ii;

(f) se $t \geq t_k$ seguir, caso contrário voltar ao passo (c) com $k = k + 1$;

(g) se $\exists(i,j): O_{i,j} \in \bar{\Omega}_k$ seguir, caso contrário voltar ao passo (c) com $k = k + 1$;

(h) redefinir as variáveis $t_{i,j}$:

$$t_{i,j} = \max\{t_k; r_{i,j}\}, \forall(i,j): O_{i,j} \in \bar{\Omega}_k \quad (30)$$

(i) **selecionar a próxima operação** (secção 4.4.3);

(j) aplicar o **algoritmo de calendarização de operações** (secção 4.4.4);

(k) redefinir a variável auxiliar t_k :

$$t_k = i_{i^*,j^*} + p_{i^*,j^*} \quad (31)$$

(l) se $i + 1 \leq n_j$ seguir, caso contrário voltar ao passo (c) com $k = k + 1$;

(m) criar a próxima operação da ordem de fabrico:

$$r_{i^*+1,j^*} = t_k \quad (32)$$

$$\bar{\Omega}'_{m_{i^*+1,j^*}} = \bar{\Omega}'_{m_{i^*+1,j^*}} \cup \{O_{i^*+1,j^*}\} \quad (33)$$

(n) retornar ao passo (c) com $k = k + 1$.

iv. Terminar.

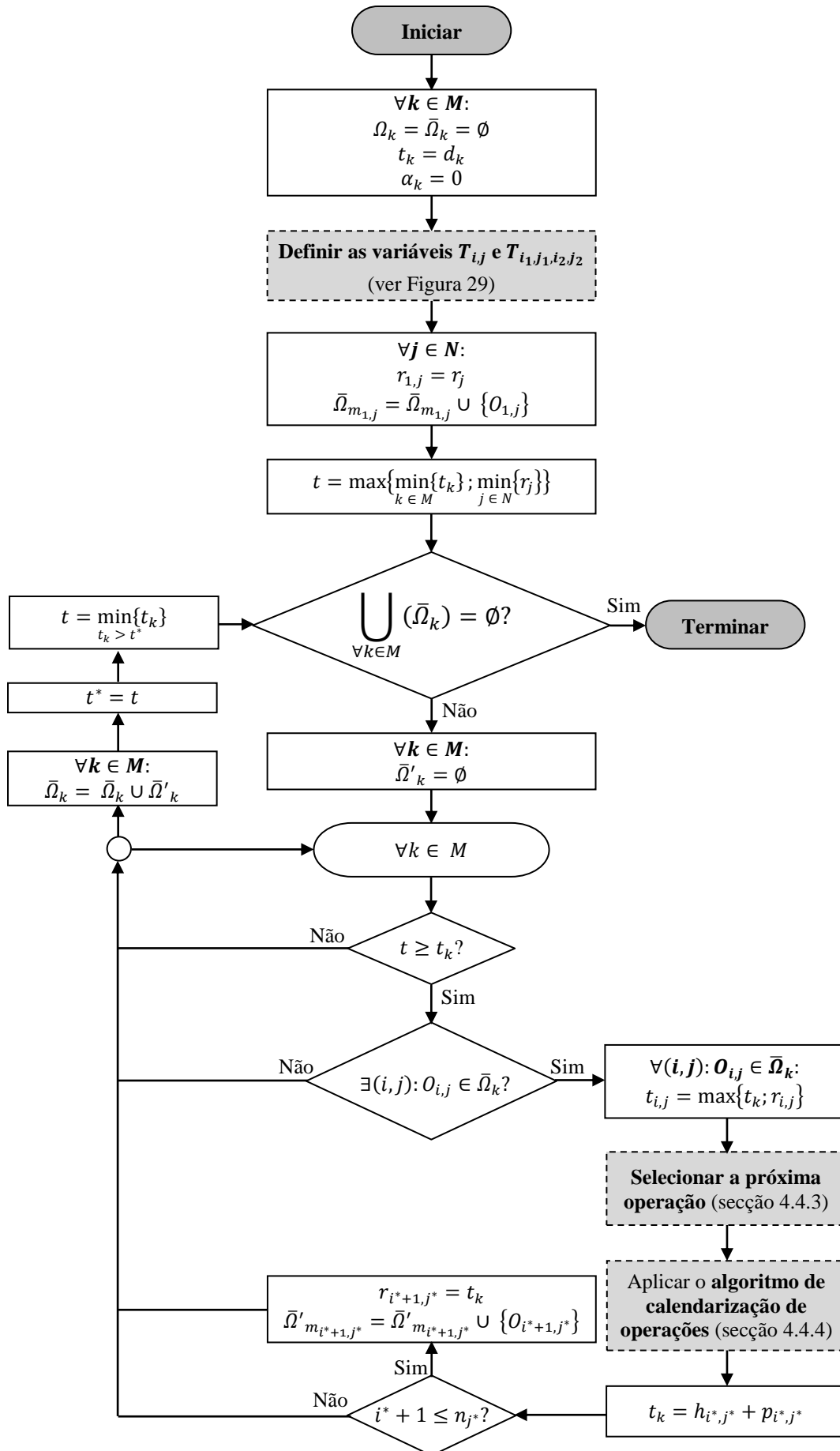


Figura 28 – Flowchart do algoritmo de sequenciamento de operações.

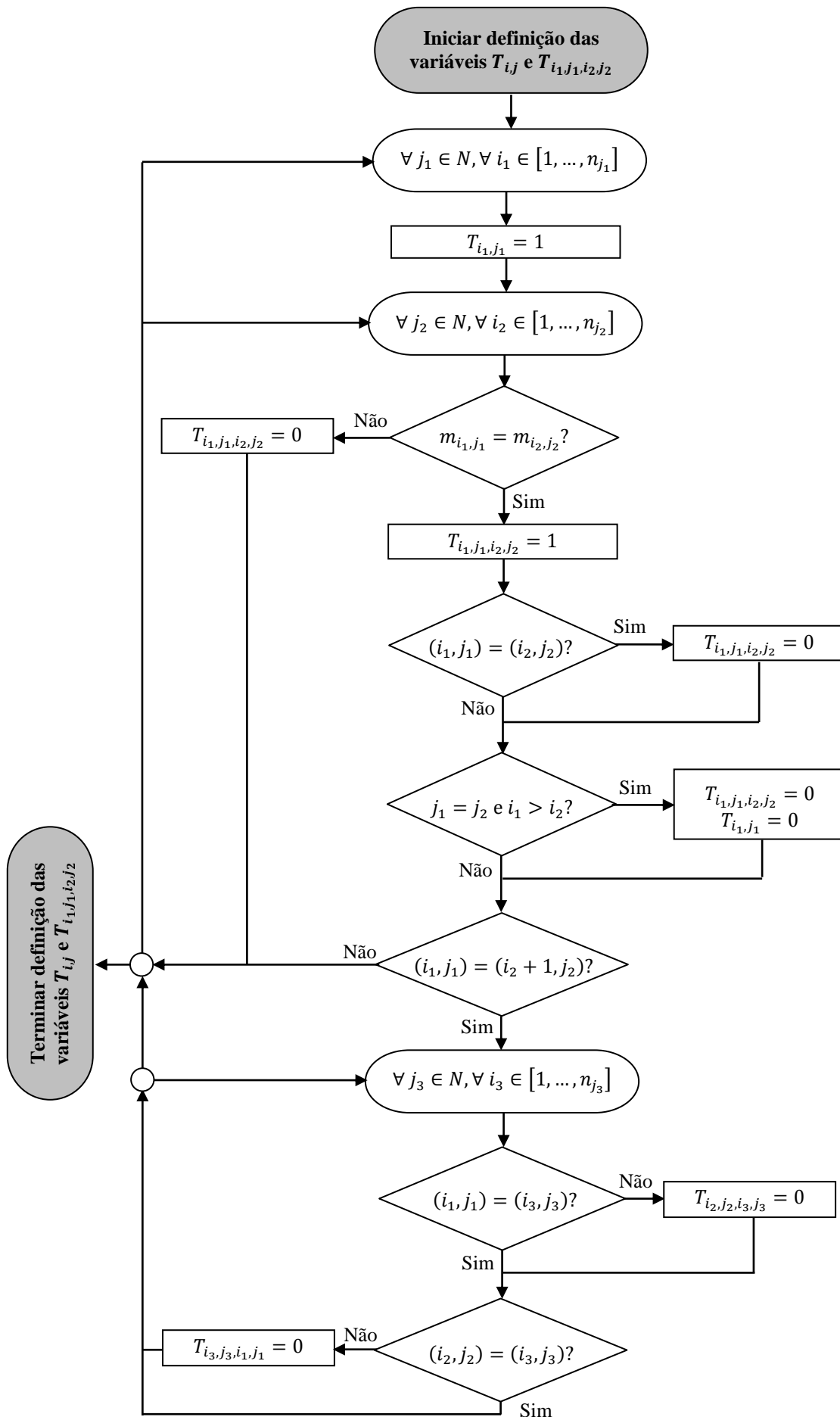


Figura 29 – Flowchart da rotina auxiliar de definição das variáveis auxiliares $T_{i,j}$ e T_{i_1,j_1,i_2,j_2} .

4.4.3 Método de seleção da próxima operação

De forma a ser possível incorporar regras de prioridade dinâmicas no sistema de apoio à decisão, é necessário, devido à existência de *setups* dependentes da sequência de operações realizadas numa máquina, estimar os tempos de *setup* das operações ainda por calendarizar. Para auxiliar o processo de seleção de operação, considerem-se então as seguintes variáveis:

$SS_{i,j}$ somatório dos tempos de *setup* possíveis para a operação $O_{i,j}$;

$n_{i,j}$ número de *setups* possíveis para a operação $O_{i,j}$.

Através das variáveis $T_{i,j}$ e T_{i_1,j_1,i_2,j_2} é possível saber quais os tempos de *setup* possíveis para as diversas operações não calendarizadas. As variáveis $SS_{i,j}$ e $n_{i,j}$ quantificam respetivamente a soma e número dos *setups* possíveis para a operação $O_{i,j}$. Apresenta-se de seguida, a fórmula de cálculo destas variáveis.

$$SS_{i_2,j_2} = \sum_{\forall j_1 \in N} \sum_{\substack{\forall i_1 \in [1, \dots, n_{j_1}]: \\ m_{i_1,j_1} = m_{i_2,j_2}}} (T_{i_1,j_1,i_2,j_2} \times s_{i_1,j_1,i_2,j_2}) + T_{i_2,j_2} \times s_{i_2,j_2} \quad (34)$$

$$n_{i_2,j_2} = \sum_{\forall j_1 \in N} \sum_{\substack{\forall i_1 \in [1, \dots, n_{j_1}]: \\ m_{i_1,j_1} = m_{i_2,j_2}}} (T_{i_1,j_1,i_2,j_2}) + T_{i_2,j_2} \quad (35)$$

É assim possível definir quais os estimadores necessários a este procedimento de seleção da próxima operação. São eles:

$\hat{s}_{i,j}$ tempo de *setup* para a operação $O_{i,j}$;

$\hat{c}_{i,j}$ tempo necessário para o processamento das operações $O_{x,j}, \forall x \in [i, \dots, n_j]$.

O estimador $\hat{s}_{i,j}$ representa o tempo de *setup* para a operação $O_{i,j}$. Este estimador corresponde à média dos *setups* possíveis para a operação $O_{i,j}$, dado o estado atual do sequenciamento. O estimador $\hat{c}_{i,j}$ representa o intervalo de tempo necessário para que todas as operações da ordem de fabrico j , desde a i -ésima até à última, sejam processadas. Note-se que a operação $O_{i,j}$ corresponde à operação da ordem de fabrico j que está na fila de espera, e que por isso, é alvo do processo de seleção. As fórmulas de cálculo destes dois estimadores são as seguintes:

$$\hat{s}_{i,j} = \frac{SS_{i,j}}{n_{i,j}} \quad (36)$$

$$\hat{c}_{i,j} = s_{i,j} \times (1 - \alpha_k) + s_{i_k^* j_k^* i,j} \times \alpha_k + p_{i,j} + \sum_{\substack{\forall x \in [i+1, \dots, n_j]: \\ m_{x,j} \neq m_{x-1,j}}} (\hat{s}_{x,j} \times (1 - s_j) + p_{x,j}) + \sum_{\substack{\forall x \in [i+1, \dots, n_j]: \\ m_{x,j} = m_{x-1,j}}} (\hat{s}_{x,j} + p_{x,j}) - \min\{s_{i,j} \times (1 - \alpha_k) + s_{i_k^* j_k^* i,j} \times \alpha_k; t_{i,j} - t_k\} \times s_j \quad (37)$$

Nas KTK, os *setups* são atualmente considerados independentes da sequência de operações e o atraso na conclusão das ordens de fabrico é tido como um dos principais fatores de avaliação de desempenho. Decidiu-se assim implementar no sistema de apoio à decisão regras de prioridade relacionadas essencialmente com a data devida de entrega e de conclusão das diversas ordens de fabrico. Eventuais regras de prioridade relacionadas com os *setups* dependentes da sequência de operações, além de não terem grande aplicabilidade prática neste momento para a empresa, são impossíveis de testar e analisar devido à inexistência de dados

que permitam construir uma matriz de tempos de *setup* dependentes da sequência de operações.

Caso haja apenas uma operação na fila de espera da máquina a considerar no momento, essa operação é imediatamente selecionada e calendarizada, sem qualquer critério de prioridade.

$$(i^*, j^*) = (i, j): O_{i,j} \in \bar{\Omega}_k \quad (38)$$

Caso haja mais que uma operação na fila de espera é necessário recorrer a uma das regras de prioridade definidas. Para tal, considerem-se as seguintes variáveis auxiliares, que permitem atribuir às operações da fila de espera um valor que traduz a sua prioridade sobre as restantes, mediante a regra em causa:

$VR_{i,j}$ valor do critério de seleção para a operação $O_{i,j}$;

VR valor referência do critério de seleção.

As regras de prioridade foram definidas através de uma análise à literatura publicada e ao contexto a que se destina o sistema de apoio à decisão. As regras definidas são as seguintes:

i. EDD (*Earliest Due Date*)

$$VR_{i,j} = D_j \quad (39)$$

ii. CR (*Critical Ratio*)

$$VR_{i,j} = \frac{D_j - t_{i,j}}{\hat{c}_{i,j}} \quad (40)$$

iii. *Min. Slack (Minimum Slack Time)*

$$VR_{i,j} = D_j - \hat{c}_{i,j} - t_{i,j} \quad (41)$$

iv. *Slack/OPN (Least Slack per Operation)*

$$VR_{i,j} = \frac{D_j - \hat{c}_{i,j} - t_{i,j}}{n_j - i + 1} \quad (42)$$

v. ERD (*Earliest Release Date*) / FIFO (*First In First Out*)

$$VR_{i,j} = r_{i,j} \quad (43)$$

vi. MDD (*Modified Due Date*)

$$VR_{i,j} = \max\{D_j; \hat{c}_{i,j} + t_{i,j}\} \quad (44)$$

vii. Tempo de *setup* e processamento mínimo (SSPT)

$$VR_{i,j} = s_{i,j} \times (1 - \alpha_k) + s_{i_k^*, j_k^*, i,j} \times \alpha_k + p_{i,j} \quad (45)$$

Após o cálculo do valor do critério de seleção selecionado para todas as operações presentes na fila de espera da máquina k , é possível determinar o valor referência do critério de seleção.

$$VR = \min_{\forall (i,j): O_{i,j} \in \bar{\Omega}_k} \{VR_{i,j}\} \quad (46)$$

A operação cujo valor do critério de seleção corresponde ao valor referência é selecionada para ser calendarizada.

$$(i^*, j^*) = (i, j): O_{i,j} \in \bar{\Omega}_k \wedge VR_{i,j} = VR \quad (47)$$

Caso duas ou mais operações da fila de espera satisfaçam o requisito anterior, utiliza-se o ERD/FIFO como principal critério de desempate.

4.4.4 Algoritmo de calendarização de operações

i. Inicializar:

- (a) definir as variáveis β e γ :

$$\beta = 1 \quad (48)$$

$$\gamma = 0 \quad (49)$$

ii. Calendarizar a operação O_{i^*,j^*} :

- (b) se $\beta = 1$ seguir, caso contrário ir para o passo vii;

- (c) definir a variável h_{i^*,j^*} :

$$h_{i^*,j^*} = \begin{cases} s_{i^*,j^*} + t_{i^*,j^*} - \min\{s_{i^*,j^*}; t_{i^*,j^*} - t_k\} \times s_j & , \alpha_k = 0 \\ s_{i_k^*,j_k^*,i^*,j^*} + t_{i^*,j^*} - \min\{s_{i_k^*,j_k^*,i^*,j^*}; t_{i^*,j^*} - t_k\} \times s_j & , \alpha_k = 1 \end{cases} \quad (50)$$

iii. Redefinir variáveis auxiliares:

- (a) redefinir as variáveis $T_{i,j}$ e T_{i_1,j_1,i_2,j_2} (ver Figura 31);

- (b) redefinir a variável α_k :

$$\alpha_k = 1 \quad (51)$$

- (c) se $i^* + 1 \leq n_{j^*}$ e $m_{i^*+1,j^*} = k$ seguir, caso contrário ir para o passo v.

iv. Calendarizar operação consecutiva da mesma ordem de fabrico:

- (a) redefinir as variáveis t_k e β :

$$t_k = h_{i^*,j^*} + p_{i^*,j^*} \quad (52)$$

$$\beta = 1 \quad (53)$$

- (b) redefinir a variável γ e atualizar os conjuntos Ω_k e $\bar{\Omega}_k$:

$$\gamma = \gamma + (t_k - t) \quad (54)$$

$$\Omega_k = \Omega_k \cup \{O_{i^*,j^*}\} \quad (55)$$

$$\bar{\Omega}_k = \bar{\Omega}_k \setminus \{O_{i^*,j^*}\} \quad (56)$$

- (c) redefinir as variáveis t e t_{i^*+1,j^*} e atualizar o conjunto $\bar{\Omega}_k$:

$$t = t_{i^*+1,j^*} = t_k \quad (57)$$

$$\bar{\Omega}_k = \bar{\Omega}_k \cup \{O_{i^*+1,j^*}\} \quad (58)$$

- (d) atualizar os índices i_k^* e j_k^* :

$$i_k^* = i^* \quad (59)$$

$$j_k^* = j^* \quad (60)$$

- (e) incrementar o índice i^* :

$$i^* = i^* + 1 \quad (61)$$

- (f) seguir para o passo vi.

v. Definir a última operação realizada na máquina:

- (a) redefinir a variável β e atualizar os índices i_k^* e j_k^* :

$$\beta = 0 \quad (62)$$

$$i_k^* = i^* \quad (63)$$

$$j_k^* = j^* \quad (64)$$

vi. Retornar ao passo ii.

vii. Finalizar a calendarização:

- (a) redefinir a variável t e atualizar os conjuntos Ω_k e $\bar{\Omega}_k$:

$$t = t - \gamma \quad (65)$$

$$\Omega_k = \Omega_k \cup \{O_{i^*,j^*}\} \quad (66)$$

$$\bar{\Omega}_k = \bar{\Omega}_k \setminus \{O_{i^*,j^*}\} \quad (67)$$

viii. Terminar.

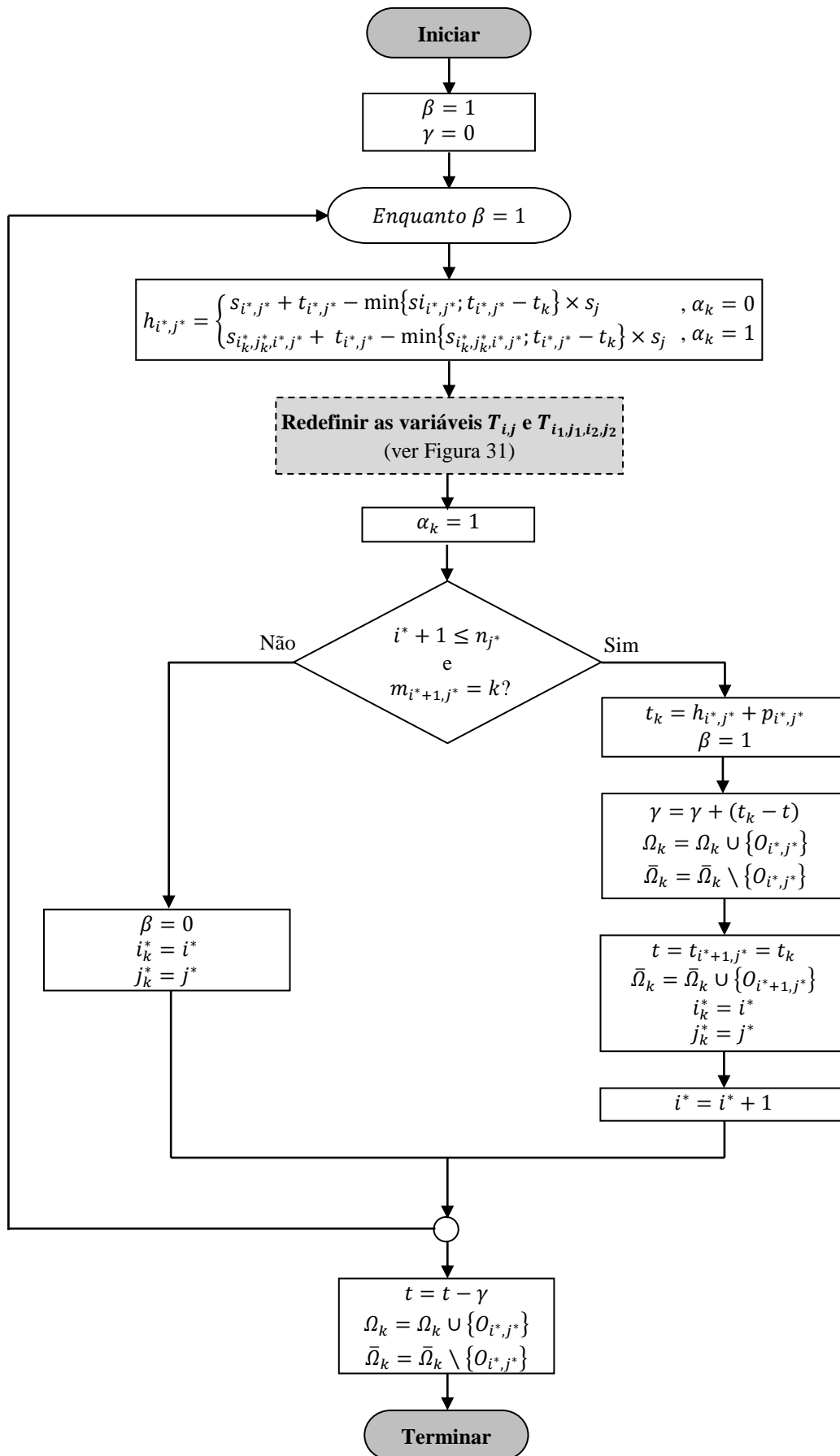


Figura 30 – Flowchart do algoritmo de calendarização de operações.

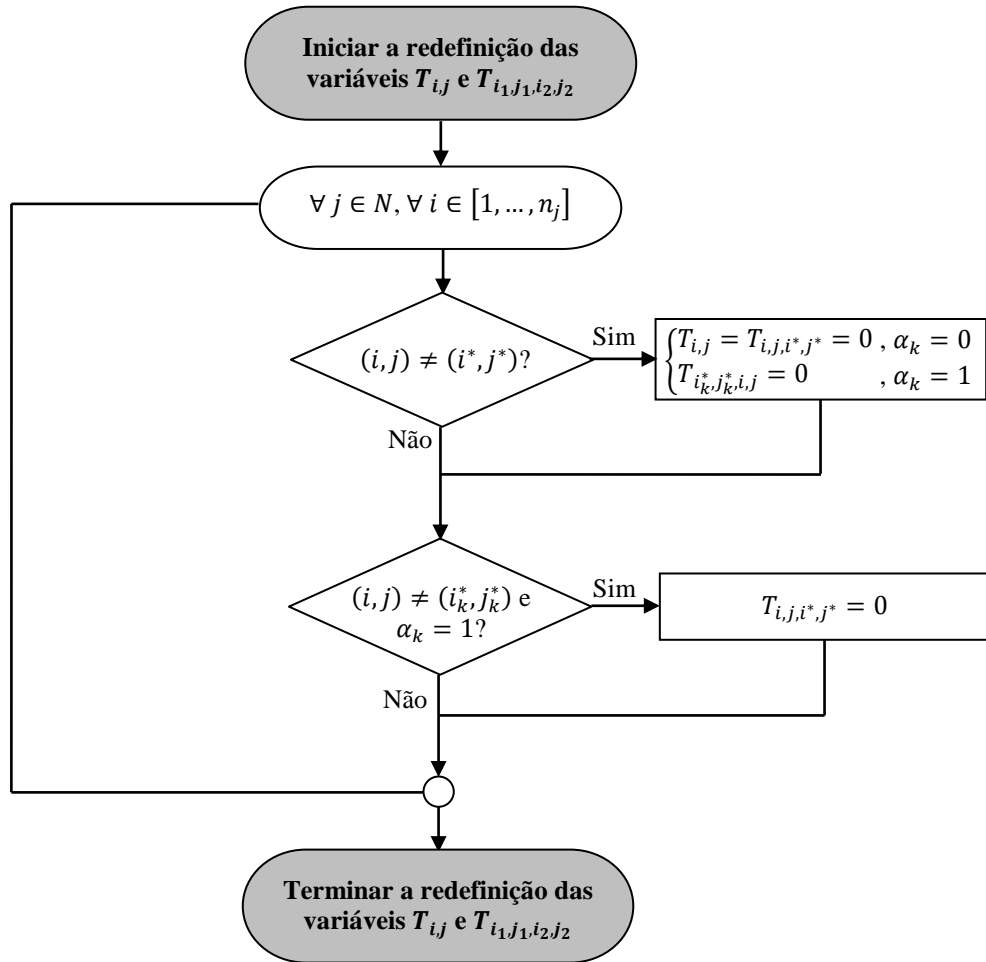


Figura 31 – Flowchart da rotina auxiliar de redefinição das variáveis auxiliares $T_{i,j}$ e T_{i_1,j_1,i_2,j_2} .

4.4.5 Cálculo de avaliadores de desempenho

A qualidade dos calendários produtivos gerados é medida através de diversos avaliadores de desempenho. Os avaliadores relativos à performance das ordens de fabrico estão descritos na secção 2.3. A sua fórmula de cálculo é a seguir apresentada.

$$C_j = h_{n,j} + p_{n,j} \quad (68)$$

$$W_j = h_{1,j} - r_j + \sum_{\forall i \in [2, \dots, n_j]} (h_{i,j} - (h_{i-1,j} + p_{i-1,j})) \quad (69)$$

$$F_j = h_{n,j} + p_{n,j} - r_j \quad (70)$$

$$L_j = h_{n,j} + p_{n,j} - D_j \quad (71)$$

$$T_j = \max \{ h_{n,j} + p_{n,j} - D_j; 0 \} \quad (72)$$

$$E_j = \max \{ D_j - h_{n,j} - p_{n,j}; 0 \} \quad (73)$$

É ainda possível obter um avaliador agregado relativo à percentagem de atrasos, através da divisão do número de ordens de fabrico atrasadas pelo número total de ordens de fabrico. Este avaliador pode ser equiparado com o avaliador de desempenho adotado pela KTK, o OTD.

Além dos indicadores relativos às ordens de fabrico, é também possível medir a qualidade dos calendários através de uma outra perspetiva: a ocupação das máquinas. Na Tabela 3 apresentam-se os avaliadores definidos, bem como a respetiva notação.

Tabela 3 – Avaliadores de desempenho na perspetiva da ocupação das máquinas.

Notação	Máquina k
TS_k	Tempo em <i>setups</i>
TD_k	Tempo desocupado
TTI_k	Tempo total improdutivo

Para o seu cálculo é necessário considerar a seguinte variável:

IP_k intervalo de planeamento da máquina k .

Esta variável permite aferir a dimensão da janela de planeamento para uma dada máquina, através da seguinte forma:

$$IP_k = \max_{\forall (i,j): m_{i,j} = k} \{h_{i,j} + p_{i,j}\} - d_k \quad (74)$$

A fórmula de cálculo dos avaliadores mencionados é a seguir apresentada.

$$TS_k = \sum_{\forall j_1 \in N} \sum_{\substack{\forall i_1 \in [1, \dots, n_{j_1}]: \\ m_{i_1, j_1} = k}} \left(T_{i_1, j_1} \times s_{i_1, j_1} + \sum_{\forall j_2 \in N} \sum_{\substack{\forall i_2 \in [1, \dots, n_{j_2}]: \\ m_{i_2, j_2} = k}} (T_{i_2, j_2, i_1, j_1} \times s_{i_2, j_2, i_1, j_1}) \right) \quad (75)$$

$$TD_k = IP_k - TS_k - \sum_{\forall j \in N} \sum_{\substack{\forall i \in [1, \dots, n_j]: \\ m_{i,j} = k}} (p_{i,j}) \quad (76)$$

$$TTI_k = TS_k + TD_k \quad (77)$$

Podem também ser calculados avaliadores percentuais nesta perspetiva, à semelhança do que acontece na perspetiva das ordens de fabrico. Basta apenas fazer um rácio entre qualquer uma das variáveis TS_k , TD_k e TTI_k e a variável IP_k , para uma qualquer máquina k , conforme a medida percentual pretendida. Estes avaliadores podem também ser obtidos utilizando-se os valores totais das referidas variáveis, caso se pretendam avaliadores globais e não relativos a apenas uma máquina.

Caso se pretenda inserir avaliadores deste tipo na função objetivo do modelo matemático, as variáveis $T_{i,j}$ e T_{i_1, j_1, i_2, j_2} devem ser respetivamente substituídas pelas variáveis $Y_{i,j}$ e X_{i_1, j_1, i_2, j_2} do respetivo modelo.

Para todos os avaliadores referidos, à exceção dos percentuais, é possível a obtenção dos seus valores médio e máximo. O valor médio de um avaliador é obtido pela divisão do seu valor total pelo número de elementos. O valor total corresponde a soma do valor do avaliador de todos os elementos. Caso se trate de um avaliador relativo às ordens de fabrico, o número de elementos corresponde ao número de ordens de fabrico. Num avaliador relativo às máquinas, o número de elementos corresponde ao número de máquinas.

5 Sistema de apoio à decisão desenvolvido

Nesta secção é apresentado o sistema de apoio à decisão desenvolvido. Além de se apresentar o funcionamento e a interface do sistema, explica-se também como foram realizados alguns testes de avaliação de desempenho do sistema. Apesar de ser difícil comparar com detalhe a performance deste sistema com a do modo de planeamento atual da empresa, foram utilizados dados do histórico de ordens de fabrico da KTK. Esta abordagem permite testar o sistema na envolvente industrial que lhe deu origem e propósito, fazendo com que a análise de sensibilidade às diferentes regras de prioridade seja feita com dados mais realistas.

5.1 Interface e modo de funcionamento

O modelo heurístico descrito na secção 4.4 foi codificado em linguagem *Visual Basic* através de uma interface em *Office Excel*. O fácil acesso a este *software*, aliado à sua versatilidade e aplicabilidade para efeitos de cálculo, levaram a que se optasse pelo seu uso.

O sistema de apoio à decisão foi desenvolvido por forma a facilitar a sua utilização. A interface em *Office Excel*, além de permitir uma fácil inserção dos dados, garante a construção e exibição dos planos de fabrico em poucos segundos.

Para definir um novo problema de planeamento, é necessário, em primeiro lugar, inserir no sistema o número de máquinas e ordens de fabrico a considerar. Para isso, na folha inicial do sistema, existe um botão que permite dar início ao processo (Figura 32).

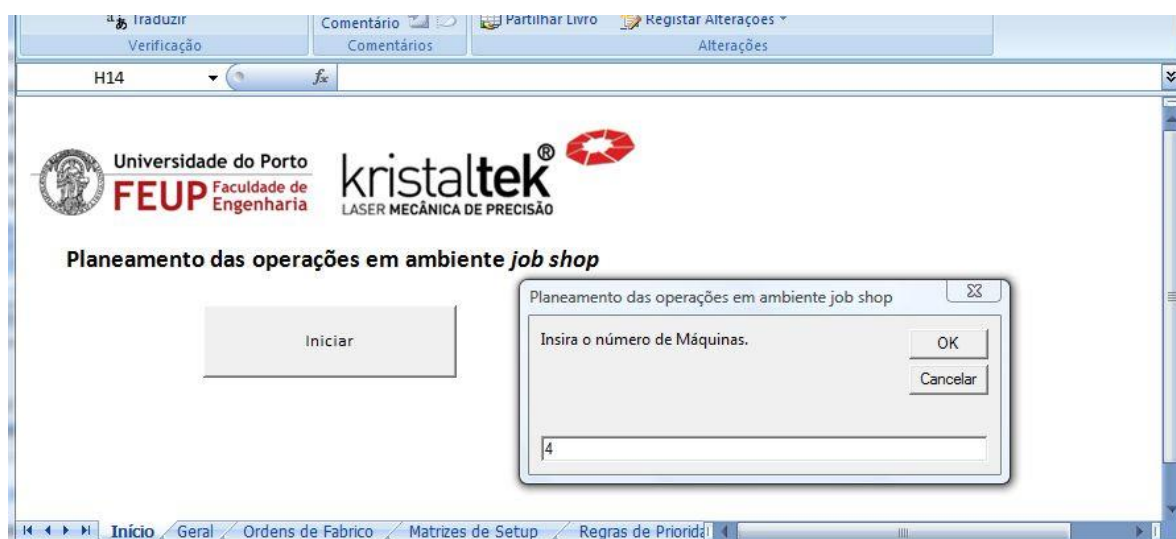


Figura 32 – Sistema desenvolvido: definição inicial de um problema.

Após o botão “Iniciar” ser pressionado, o sistema abre uma janela para a inserção do número de máquinas a considerar no evento de planeamento. Em seguida este processo repete-se para a definição do número de ordens de fabrico a considerar.

Na etapa seguinte é necessário proceder à definição dos parâmetros relacionados com as máquinas e com as ordens de fabrico. Relativamente às máquinas, apenas é necessário inserir no sistema a hora da disponibilidade inicial de cada uma delas. Quanto às ordens de fabrico, insere-se a hora de início de processamento mínima, a data devida de entrega, o número de operações e o valor da variável binária que reflete a possibilidade, ou impossibilidade, da sobreposição de *setups* com operações (Figura 33).

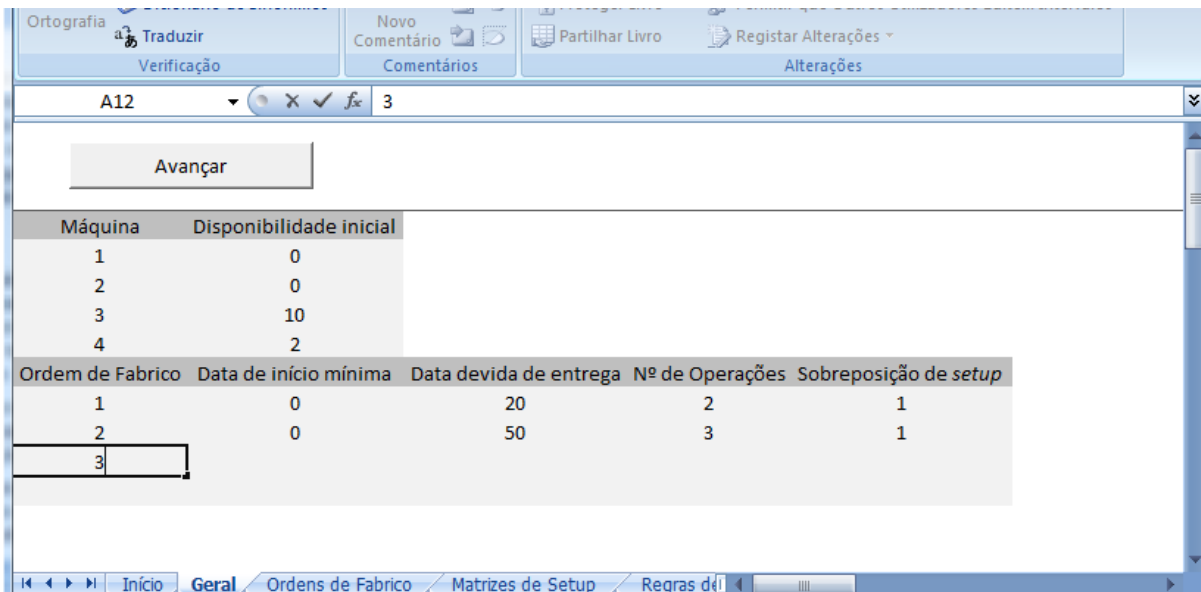


Figura 33 – Sistema desenvolvido: parâmetros das máquinas e ordens de fabrico.

Segue-se a inserção dos dados relativos às operações. Existe uma lista para cada ordem de fabrico, na qual constam as suas operações. Nessas listas, é necessário inserir para cada operação a duração do processamento e a máquina onde ela é realizada (Figura 34).

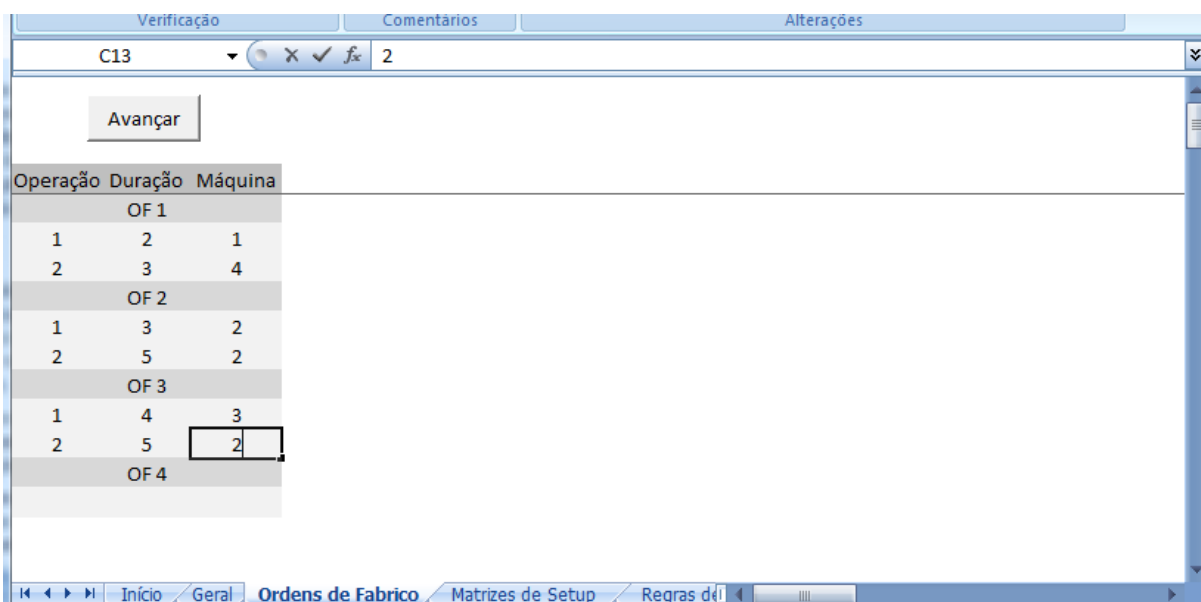


Figura 34 – Sistema desenvolvido: parâmetros das operações.

O passo seguinte consiste na construção das matrizes de *setup*. Para cada máquina é automaticamente criada uma matriz de *setup*, onde apenas constam as respetivas operações. Para auxiliar o utilizador do sistema, e para evitar a ocorrência de erros, apenas é possível a inserção de tempos de *setup* em células correspondentes a possibilidades de consecutividade exequíveis. As restantes células das matrizes estão sinalizadas e bloqueadas à edição, o que facilita o seu preenchimento por parte do utilizador (Figura 35).

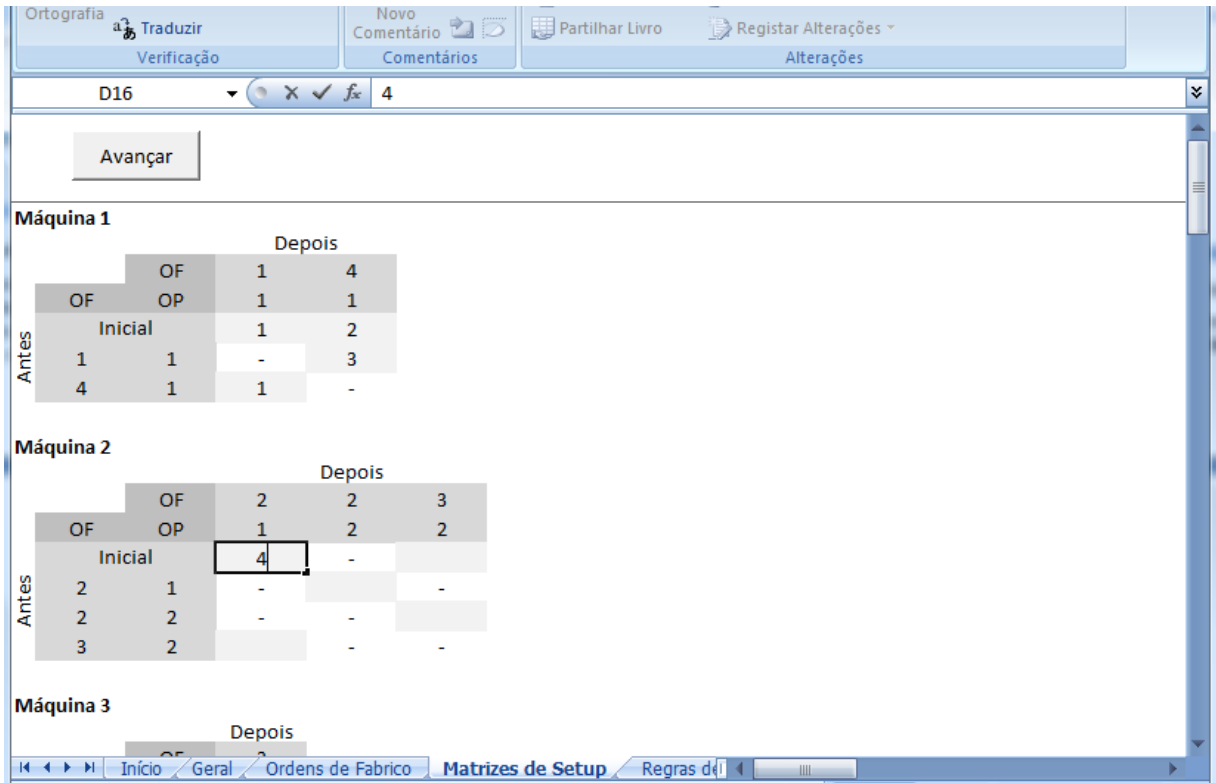


Figura 35 – Sistema desenvolvido: matrizes de setup.

Após a inserção de todos os parâmetros no sistema, falta apenas necessário seleccionar a regra de prioridade que será utilizada para determinar qual a próxima operação a ser calendarizada. Consoante os dados do evento, e o objetivo a atingir, as diferentes regras podem ter desempenhos diferentes. É assim necessário analisar qual a regra que melhor se adequa às circunstâncias do momento (Figura 36).

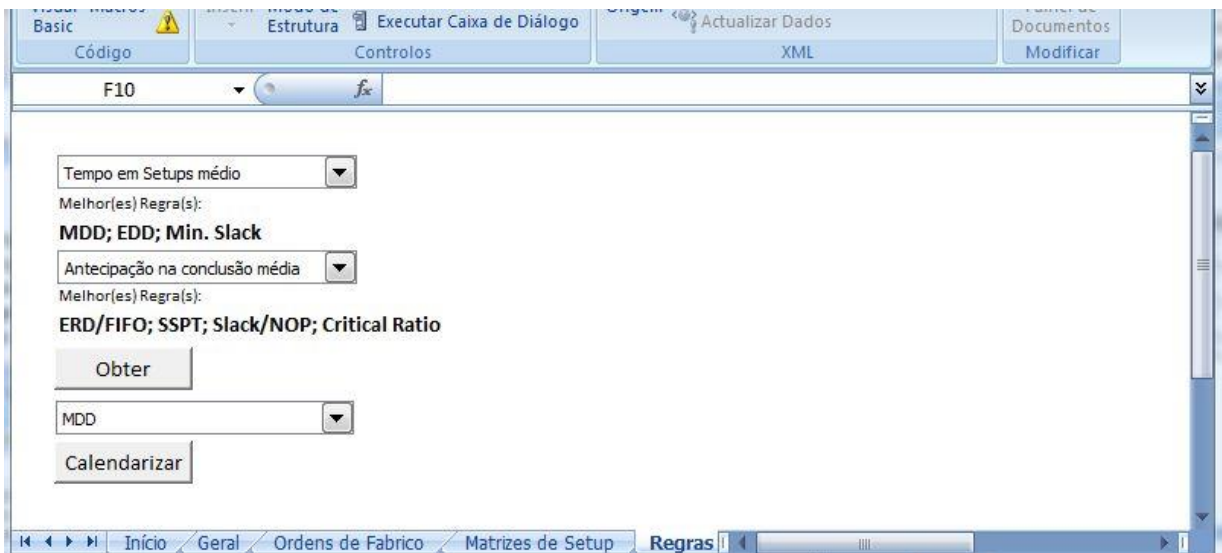


Figura 36 – Sistema desenvolvido: regras de prioridade.

O sistema desenvolvido permite que o utilizador faça uma rápida análise de sensibilidade às diferentes regras de prioridade consoante os dados do momento. É possível determinar quais as regras que apresentam melhor desempenho, mediante determinado critério de prioridade. Nas duas primeiras caixas de seleção apresentadas na Figura 36 estão listados os avaliadores de desempenho dos calendários gerados. Uma contém os avaliadores na perspectiva das ordens de fabrico, e a outra os avaliadores na perspectiva da ocupação das máquinas (descritos na

secção 4.4.5). Após se seleccionar quais os indicadores a analisar, um de cada tipo, é apenas necessário clicar no botão “Obter”. O sistema imprime, junto à respetiva caixa de selecção, quais as regras que apresentam melhor desempenho consoante os indicadores seleccionados.

No exemplo presente na Figura 36, as regras MDD, EDD e *Min. Slack* são, entre as definidas no sistema, as que geram calendários nos quais o tempo de *setup* médio é menor. Já as regras ERD/FIFO, SSPT, *Slack/OPN* e CR são, entre o lote de regras de prioridade definidas, as que geram calendários nos quais a antecipação na conclusão média das ordens de fabrico é menor.

Após fazer uma breve análise de sensibilidade as diferentes regras, o utilizador pode agora seleccionar a regra de prioridade mais adequada às circunstâncias do momento. As 7 regras de prioridade definidas estão listadas na terceira caixa de selecção apresentada na Figura 36. Basta apenas seleccionar a pretendida e clicar no botão “Calendarizar”, para que o calendário seja gerado e impresso na folha de cálculo seguinte (Figura 37).

	Setup	OP	OF	Hora Início	Hora Fim		OP	Máquina	Hora Início	Hora Fim
Máquina 1	X			1,00	3,00	1	1	1	6,00	8,00
		1	4	3,00	5,00		2	4	8,00	11,00
	X			5,00	6,00	2	1	2	4,00	7,00
		1	1	6,00	8,00		2	2	15,00	20,00
Máquina 2	X			0,00	4,00	3	1	3	11,00	15,00
		1	2	4,00	7,00		2	2	23,00	28,00
	X			7,00	15,00	4	1	1	3,00	5,00
		2	2	15,00	20,00					
Máq	X			20,00	23,00					
		2	3	23,00	28,00					
Máq	X			10,00	11,00					
		1	3	11,00	15,00					
Máq	X			3,00	8,00					
		2	1	8,00	11,00					

Figura 37 – Sistema desenvolvido: calendários gerados.

Apesar do diagrama de Gantt ser a forma mais usual para representar calendários produtivos, optou-se por imprimir os calendários gerados pelo sistema de apoio à decisão sob a forma de listas. Através desta representação são criadas duas listas independentes, uma relativa às máquinas e outra relativa às ordens de fabrico, na qual constam a hora de início e término das respetivas operações. Na lista relativa às máquinas constam ainda os *setups*. No canto superior esquerdo da folha de cálculo são apresentados o tempo de execução do sistema e o número de decisões (selecção da próxima operação) que foi necessário tomar através de regras de prioridade. À frente deste valor, é possível ver-se, entre parêntesis, o número médio de operações presentes na fila de espera por decisão deste tipo.

O tempo de execução exibido pelo sistema corresponde ao tempo (minutos) necessário para gerar a solução. Inclui ainda o tempo que o sistema gasta na leitura e armazenamento dos dados e na impressão dos calendários. O tempo gasto pelo utilizador na inserção dos dados no sistema não está incluído.

Esta representação é bastante útil e intuitiva para verificar, não só a hora de início dos *setups* e do processamento das operações, mas também o cumprimento das restrições tecnológicas (sequência de operações dentro da mesma ordem de fabrico e capacidade das máquinas). Esta parece ser uma boa forma de representar o resultado do planeamento, visto este sistema funcionar como apoio à decisão para o agente de planeamento. Rapidamente se consegue tirar ilações deste planeamento, que auxiliarão a construção dos calendários produtivos definitivos.

O sistema desenvolvido permite ainda o cálculo de diversos avaliadores de desempenho. Os avaliadores apresentados na secção 4.4.5 são calculados e impressos automaticamente pelo sistema, após o botão “Avançar” presente na folha dos calendários ser selecionado (Figura 38).

OF	Data de Conclusão	Tempo em Espera	Tempo de Permanência	Desvio	Atraso na Conclusão	Antecipação na Conclusão	Máquina	Tempo em Setups	Tempo Desocupado	Tempo Total Improdutivo
1	11,00	6,00	11,00	-9,00	0,00	9,00	1	3,00	1,00	4,00
2	20,00	12,00	20,00	-30,00	0,00	30,00	2	15,00	0,00	15,00
3	28,00	18,00	27,00	-12,00	0,00	12,00	3	1,00	0,00	1,00
4	5,00	0,00	2,00	-10,00	0,00	10,00	4	5,00	1,00	6,00
Total	64,00	36,00	60,00	-61,00	0,00	61,00	Total	24,00	2,00	26,00
Média	16,00	9,00	15,00	-15,25	0,00	15,25	Média	6,00	0,50	6,50
%	-	-	-	-	0,00%	100,00%	%	48,00%	4,00%	52,00%

Figura 38 – Sistema desenvolvido: avaliadores de desempenho.

Além de serem listados individualmente por ordem de fabrico ou por máquina, caso sejam relativos às ordens de fabrico ou relativos à ocupação do tempo das máquinas respetivamente, os avaliadores são também exibidos através do seu valor total e médio. Os valores máximos de cada avaliador são impressos a vermelho, para ser possível identificar mais rapidamente a ordem de fabrico ou máquina em causa. São ainda exibidos alguns avaliadores percentuais, entre os quais se destaca a percentagem de ordens de fabrico atrasadas.

5.2 Testes computacionais

Por forma a analisar a performance do sistema de apoio à decisão desenvolvido, foram feitos testes ao seu funcionamento com dados de diversas ordens de fabrico da KTK. O planeamento da produção na KTK, além de não definir a hora de início de processamento das diversas operações, não calcula diretamente avaliadores de desempenho dos calendários obtidos. Isto leva a que uma eventual comparação entre os calendários gerados pelo sistema e os obtidos pela empresa seja pouco precisa e, de certa forma, pouco fundamentada.

Contudo, a realização de testes computacionais com dados reais permite, por oposição ao que acontece quando se utilizam dados totalmente aleatórios, estudar o funcionamento do sistema no contexto a que se destina. Apesar de não ser possível comparar a qualidade da solução obtida pelo sistema com a obtida pela empresa, é possível analisar os potenciais ganhos em termos de tempo e flexibilidade que este sistema acarreta, fruto das diversas simulações feitas recorrendo às distintas regras de prioridade incorporadas no sistema.

A análise das folhas de cálculo de planeamento da KTK, tal como a realizada no decurso do projeto, não permite apurar, de forma precisa, todos os parâmetros envolvidos num dado evento de planeamento. As datas mínimas de início de processamento das ordens de fabrico e

as datas da disponibilidade inicial das máquinas são exemplos disto mesmo, sendo-lhes por isso atribuído o valor 0 nas instâncias analisadas. A inexistência de tempos de *setup* para todas as possibilidades de consecutividade de operações, fez com que se tenha considerado para cada operação, independentemente da operação antecedente, sempre o mesmo tempo de *setup*. Este parâmetro é quantificado através da seguinte variável:

$st_{i,j}$ tempo de *setup* que antecede a operação $O_{i,j}$.

Esta pode ser obtida através da seguinte forma:

$$\forall j_1 \in N, \forall i_1 \in [1, \dots, n_{j_1}]: s_{i_1, j_1, i_2, j_2} \in \mathbb{R}_0^+$$

$$st_{i_2, j_2} = s_{i_2, j_2} = s_{i_1, j_1, i_2, j_2} \quad (78)$$

A quantidade média de ordens de fabrico lançadas por mês na KTK é de cerca de 70. Caso o sistema desenvolvido seja utilizado regularmente numa base semanal, o número de ordens de fabrico em consideração deverá ser inferior a este. Contudo, as folhas de cálculo analisadas contêm informação acumulada, relativa a várias semanas. Dessa feita, a quantidade de dados aí existentes levou à criação de problemas de grande dimensão.

A resolução de problemas com instâncias de grande dimensão, tal como os resolvidos no decurso dos testes de desempenho, permite testar a performance do sistema em circunstâncias rigorosas. É expectável que as circunstâncias da utilização do sistema em uso corrente sejam menos complexas e exigentes do que estas. Espera-se, por isso, que o processo de geração da solução nesse cenário seja mais célere que o verificado nas simulações.

Foram resolvidos 4 problemas, pelas 7 distintas regras definidas, o que equivale à geração de 28 soluções. Os dados gerais dos problemas estão disponíveis na Tabela 4. Os testes foram executados num ambiente *Windows Vista*, CPU 2,00GHz, com 4,00GB de memória RAM.

Tabela 4 – Dados gerais dos problemas analisados.

Problema	Máquinas	Ordens de fabrico	Operações	Instância de dados ¹³
P1	14	91	240	ANEXO A
P2	13	81	204	ANEXO B
P3	14	67	162	ANEXO C
P4	13	63	154	ANEXO D

Os avaliadores dos diversos calendários gerados pelo sistema com o desenrolar dos testes de desempenho são apresentados em anexo¹⁴. Independentemente do problema em análise, e da regra adotada, sabe-se que o sistema alcançou a solução em menos de 10 segundos, o que se afigura bastante positivo. As ilações a retirar destes testes são apresentadas na próxima secção. Aí, é feita uma análise de sensibilidade às diferentes regras, prestando especial atenção aos avaliadores relacionados com o atraso das ordens de fabrico.

¹³A presença de datas devidas de entrega negativas nas instâncias de dados resulta de um, ou da combinação, de dois fatores. Primeiro, sabe-se que a data devida de entrega presente nas folhas de cálculo disponibilizadas consiste no prazo inicial pedido pelo cliente. No entanto, este mesmo prazo é depois reajustado pela KTK (alargado), consoante a sua disponibilidade de recursos, e acordado com o cliente. Na realidade não se verifica este atraso ainda antes do planeamento acontecer. Segundo, pode dar-se o caso da ordem de fabrico estar desde logo atrasada, ou perto disso, no início de um evento de planeamento, fruto do desequilíbrio carga-capacidade. Para não diminuir ainda mais as datas devidas de entrega a considerar nos testes, optou-se por não subtrair destas o tempo estimado necessário às operações e *setups* a realizar após as operações de maquinação das diversas ordens de fabrico.

¹⁴Para cada avaliador indica-se a cor verde o valor que corresponde à regra (ou regras) com melhor desempenho.

6 Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

No decurso deste projeto foi analisada a forma como o planeamento da produção é feito numa empresa industrial com um sistema de produção do tipo *job shop*. O planeamento em análise consiste na calendarização do processamento de um conjunto de ordens de fabrico. Cada ordem de fabrico corresponde a uma sequência pré-determinada de operações, cuja sequência deve ser garantida. Além disto, há ainda que garantir a limitação da capacidade das máquinas.

Na KTK, apesar de serem impressos e afixados nas diversas máquinas os diagramas de Gantt, o planeamento é pensado de forma essencialmente manual. Embora o ERP da empresa tenha um módulo de planeamento da produção, o mesmo não está totalmente funcional e adaptado à realidade produtiva da empresa, fazendo com que recursos e tempo tenham que ser gastos nesta atividade.

Para resolver este problema de planeamento, procedeu-se à definição do modelo matemático de programação linear. No entanto, a determinação da solução ótima para este modelo não é fácil dada a sua complexidade e dimensão, pelo que seria necessário a aquisição de *software* de otimização de que a empresa não dispõe. Mesmo assim, o tempo necessário à obtenção dessa solução ótima poderia não ser compatível com o tempo de resposta disponível. Por estes motivos, foi decidido definir um modelo heurístico, por forma a ser possível desenvolver um sistema de apoio à decisão para o efeito. O referido modelo baseia-se em regras de prioridade, visto ser um método de resolução por aproximação pouco complexo e facilmente entendido pelos utilizadores. Os agentes de planeamento podem, através deste método, ter uma maior perceção e compreensão do processo de tomada de decisão, aquando da seleção da operação seguinte a calendarizar. Foram definidas regras de prioridade que visam a data de conclusão e a data devida de entrega das ordens de fabrico. O facto de não haver dados relativos aos diferentes tempos de *setup* possíveis em função da sequência das operações realizadas numa determinada máquina, fez com que não fosse possível testar e aplicar outras regras que estivessem relacionadas com os *setups*.

Por forma a averiguar as implicações das distintas regras de prioridade incorporadas, foram realizados testes computacionais a este sistema com dados do histórico de ordens de fabrico da empresa. Em qualquer um dos testes, verificou-se um tempo de execução de poucos segundos. Quando comparado com o sistema atual, este sistema permite um ganho imenso em termos de tempo e velocidade na resolução dos problemas.

Relativamente ao atraso médio (e atraso total), sabe-se que a regra MDD é a que apresenta melhor desempenho nos 4 problemas analisados. São ainda obtidas, através desta regra, as menores percentagens de ordens de fabrico atrasadas nesses problemas. Quanto ao atraso máximo, a regra EDD consegue ter o melhor desempenho em 3 dos 4 problemas.

A regra EDD baseia-se em informação relativa às datas devidas de entrega das ordens de fabrico, sendo por isso indicada para a diminuição do atraso máximo. A regra MDD, por oposição ao que acontece na EDD, vai sendo atualizada à medida que a calendarização é feita, o que a torna dinâmica. Esta regra tem em consideração o estado atual do problema. Caso se esteja a induzir uma ordem de fabrico em atraso, o seu valor é atualizado para o instante de tempo em que se prevê a sua conclusão; caso contrário, o seu valor é mantido na data devida de entrega. Nos problemas em análise, dado o elevado número de ordens de fabrico quando comparado com o número de máquinas (carga superior à capacidade), a regra MDD parece

ser mais indicada. É expectável que a data de conclusão das ordens de fabrico seja superior à sua data devida de entrega, à medida que a calendarização avança.

A análise de regras orientadas a avaliadores de desempenho relacionados com a ocupação das máquinas fica desde logo condicionada, fruto do desconhecimento dos tempos *setup* dependentes da sequência de operações. Para todos os problemas em análise, independentemente da regra selecionada, o tempo médio e máximo gasto em *setups* é igual. Contudo, o tempo desocupado pode sofrer alterações consoante a regra adotada. Fruto destas variações, o tempo total improdutivo também apresenta diferentes valores consoante a regra selecionada. A regra ERD/FIFO é, em 3 dos 4 problemas, a que melhor resultado apresenta na minimização destes valores médios.

A criação de novos parâmetros nas instâncias de dados, tais como a importância (ou peso) das ordens de fabrico ou a identificação do cliente das mesmas, possibilitaria a incorporação de novas regras de prioridade no sistema de apoio à decisão. Com a definição da importância das ordens de fabrico, poderiam ser modeladas regras que tivessem em conta o peso relativo de cada uma das ordens de fabrico. Essas regras poderiam ser adaptadas das atuais, bastando apenas multiplicar o seu valor pela importância relativa da ordem de fabrico. Da regra data de entrega modificada (MDD), por exemplo, poderia surgir uma nova regra, a data de entrega modificada ponderada. O mesmo pode ocorrer para as restantes regras agora definidas.

A definição do parâmetro cliente associado às ordens de fabrico proporcionaria a possibilidade da incorporação de regras com bastante aderência à realidade produtiva da KTK. Poderiam ser definidas regras e, do mesmo modo, avaliadores de desempenho, que permitiriam entrar em consideração com o estado atual de todas as ordens de fabrico do mesmo cliente. Poderiam ser definidas regras, a partir das atuais, que tinham como objetivo reduzir os diversos avaliadores, não nos seus valores médios ou máximos, mas por cliente. A regra folga mínima (*Min. Slack*) poderia dar origem a uma nova regra, folga por cliente, por exemplo. Esta regra teria como principal objetivo a redução do atraso por cliente. Ao invés de ser selecionada a ordem de fabrico com menor folga, seria selecionada a ordem de fabrico que pertencesse ao cliente que tem a menor folga total. Como folga total de um cliente subentende-se a soma das folgas de todas as ordens de fabrico desse mesmo cliente.

Por forma a aumentar a flexibilidade e adaptabilidade do sistema, poderiam ser incorporadas novas funcionalidades capazes de aumentar a partilha de informação e conhecimento entre o agente de planeamento e o sistema computadorizado. Uma possibilidade é a modelação e codificação de um novo algoritmo, que permitira ao agente de planeamento calendarizar as operações de uma máquina, a máquina crítica. O sistema ficaria responsável por calendarizar as restantes operações, consoante o planeamento já efetuado manualmente. A criticidade de uma máquina poderia ser medida, por exemplo, pela sua carga de trabalho.

Para efeitos de planeamento da produção, os tempos de *setup* deveriam ter, por parte da empresa, outro tipo de tratamento. Dada a sua importância, quer pela sua dimensão temporal, quer pela sua elevada frequência de ocorrência, estes deveriam ser tratados de forma isolada. Numa abordagem deste tipo, o tempo de processamento das operações, apenas contemplaria o tempo de maquinação em série e o tempo de validação da primeira peça. Seria assim possível fazer uma análise isolada aos tempos e, naturalmente, aos custos de *setup* (perdas de produção).

Por forma a tirar o máximo partido do sistema criado, seria interessante a KTK adotar uma abordagem na qual os tempos de *setup* sejam considerados dependentes da sequência de operações. A função planeamento da produção poderia fazer estimativas dos tempos de *setup*

para as diversas possibilidades de consecutividade entre operações. Estas poderiam basear-se no número e tipo de ferramentas que ficam alojadas na máquina entre operações. Contudo, dado o elevado número de ordens de fabrico em circulação, e a elevada natureza combinatória de um processo ao estilo *job shop*, esta tarefa não é de fácil e direta prossecução. Uma possibilidade é, numa primeira fase, fazer uma análise experimental a este tipo de abordagem.

Em estudos académicos futuros poder-se-á utilizar *software* de otimização disponível na FEUP para a determinação da solução ótima do modelo de programação linear desenvolvido para a representação do problema real. Deste modo, poder-se-ia comparar, para algumas instâncias do problema real, as soluções obtidas pelo modelo heurístico (regras de prioridade) com as soluções ótimas dessas mesmas instâncias.

Referências

- Adams, Joseph, Egon Balas e Daniel Zawack. 1988. "The Shifting Bottleneck Procedure for Job Shop Scheduling." *Management Science* no. 34 (3):391-401. Acedido a 02 de maio de 2014. doi: 10.1287/mnsc.34.3.391.
- Allahverdi, Ali, Jatinder N. D. Gupta e Tariq Aldowaisan. 1999. "A review of scheduling research involving setup considerations." *Omega* no. 27 (2):219-239. Acedido a 01 de abril de 2014. doi: 10.1016/S0305-0483(98)00042-5.
- Baker, Albert D. 1998. "A survey of factory control algorithms that can be implemented in a multi-agent heterarchy: dispatching, scheduling, and pull." *Journal of Manufacturing Systems* no. 17 (4):297-320. Acedido a 21 de março de 2014. doi: 10.1016/S0278-6125(98)80077-0.
- Blackstone Jr, John H., Don T. Phillips e Gary L. Hogg. 1982. "State-of-the-art Survey of Dispatching Rules for Manufacturing Job Shop Operations." *International Journal of Production Research* no. 20 (1):27-45. Acedido a 05 de junho de 2014. doi: 10.1080/00207548208947745.
- Błażewicz, Jacek, Wolfgang Domschke e Erwin Pesch. 1996. "The job shop scheduling problem: Conventional and new solution techniques." *European Journal of Operational Research* no. 93 (1):1-33. Acedido a 04 de junho de 2014. doi: 10.1016/0377-2217(95)00362-2.
- Chaudhry, I. A.. 2012. "Job shop scheduling problem with alternative machines using genetic algorithms." *Journal of Central South University* no. 19 (5):1322-1333. Acedido a 12 de junho de 2014. doi: 10.1007/s11771-012-1145-8.
- Chryssolouris, George. 2006. *Manufacturing Systems: Theory and Practice*. 2ª ed., Mechanical Engineering Series. Nova Iorque: Springer.
- Conway, Richard W., William L. Maxwell e Louis W. Miller. 1976. *Theory of scheduling*. Reading: Addison-Wesley.
- Fattahi, Parviz, Mohammad Saidi e Fariborz Jolai. 2007. "Mathematical modeling and heuristic approaches to flexible job shop scheduling problems." *Journal of Intelligent Manufacturing* no. 18 (3):331-342. Acedido a 23 de maio de 2014. doi: 10.1007/s10845-007-0026-8.
- French, Simon. 1982. *Sequencing and Scheduling: An introducing to the Mathematics of the Job-Shop*. Chichester: Ellis Horwood Limited.
- Garey, Michael R. e David S. Johnson. 1979. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. Nova Iorque: W. H. Freeman.
- Glover, Fred. 1986. "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence." *Computers & Operations Research* no. 13 (5):533-549. doi: 10.1016/0305-0548(86)90048-1.
- Guedes, Alcibiades P.. 2006. "Planeamento Integrado & Gestão de Stocks". [Material de apoio às aulas da disciplina de Logística]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e Porto Business School.
- Herrmann, Jeffrey. 2006. "A History of Production Scheduling." Em *Handbook of production scheduling*, 1-22. Nova Iorque: Springer.

Hillier, Frederick S. e Gerald J. Lieberman. 2001. *Introduction to Operations Research*. 7ª ed. Nova Iorque: McGraw-Hill.

Holland, John H.. 1975. *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. Ann Arbor: University of Michigan Press.

Jacobs, F. Robert e Richard B. Chase. 2011. *Operations and Supply Chain Management*. 13ª ed. Nova Iorque: McGraw-Hill.

Kim, S. C. e P. M. Bobrowski. 1994. "Impact of sequence-dependent setup time on job shop scheduling performance." *International Journal of Production Research* no. 32 (7):1503-1520. Acedido a 28 de maio de 2014. doi: 10.1080/00207549408957019.

Kirkpatrick, S., C. D. Gelatt e M. P. Vecchi. 1983. "Optimization by Simulated Annealing." *Science* no. 220 (4598):671-680. doi: 10.1126/science.220.4598.671.

Krajewski, Lee J., Barry E. King, Larry P. Ritzman e Danny S. Wong. 1987. "Kanban, MRP, and Shaping the Manufacturing Environment." *Management Science* no. 33 (1):39-57. Acedido a 02 de abril de 2014. doi: 10.1287/mnsc.33.1.39.

Marques, Manuel Pina. 1993. "Programação de operações fabris em ambiente de "job-shop": nova abordagem". PhD, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Acedido a 24 de março de 2014.

http://eos.fe.up.pt:1801/webclient/DeliveryManager?custom_att_2=simple_viewer&metadata_request=false&pid=7772.

Moghaddas, R. e M. Houshmand. 2008. "Job-shop scheduling problem with sequence dependent setup times". Comunicação apresentada em International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2008 Vol II, em Hong Kong. 19 a 21 de março de 2008.

Pacheco, Ricardo F. e Miguel Cezar Santoro. 1999. "Proposta de Classificação Hierarquizada dos Modelos de Solução para o Problema de Job Shop Scheduling." *Gestão & Produção* no. 6 (1):1-15. Acedido a 21 de março de 2014. doi: 10.1590/S0104-530X1999000100001.

Papadimitriou, Christos H. . 2003. Computational Complexity. Em *Encyclopedia of Computer Science*. 4ª ed. Chichester: John Wiley and Sons Ltd. Acedido a 30 de maio de 2014. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1074100.1074233>.

Park, Jung-Hyeon e Dong-Ho Lee. 2012. "Job Shop Scheduling with Job Families and Sequence-dependent Setups: Minimizing the Total Family Flow Time". Comunicação apresentada em Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference 2012, em Bangucoque. 2 a 5 de dezembro de 2012.

Pinedo, Michael L. 2008. *Scheduling theory, algorithms, and systems*. 3ª ed. Nova Iorque: Springer.

Rajendran, Chandrasekharan e Oliver Holthaus. 1999. "A comparative study of dispatching rules in dynamic flowshops and jobshops." *European Journal of Operational Research* no. 116 (1):156-170. Acedido a 25 de março de 2014. doi: 10.1016/S0377-2217(98)00023-X.

Sun, Xiaoqing e James S. Noble. 1999. "An approach to job shop scheduling with sequence-dependent setups." *Journal of Manufacturing Systems* no. 18 (6):416-430. Acedido a 21 de março de 2014. doi: 10.1016/S0278-6125(00)87643-8.

Talbi, El-Ghazali. 2009. "Single-Solution Based Metaheuristics." Em *Metaheuristics: From Design to Implementation*, 87-189. Nova Jérσία: John Wiley & Sons, Inc.

Wilbrecht, Jon K. e William B. Prescott. 1969. "The Influence of Setup Time on Job Shop Performance." *Management Science* no. 16 (4):B-274-B-280. Acedido a 02 de abril de 2014. doi: 10.1287/mnsc.16.4.B274.

Zandieh, M., S. M. T. Fatemi e S. M. Moattar. 2006. "An immune algorithm approach to hybrid flow shops scheduling with sequence-dependent setup times." *Applied Mathematics and Computation* no. 180 (1):111-127. Acedido a 18 de abril de 2014. doi: 10.1016/j.amc.2005.11.136.

ANEXO A: problema P1

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$d_k[\text{min}]$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

j	$r_j[\text{min}]$	$D_j[\text{min}]$	n_j	s_j	j	$r_j[\text{min}]$	$D_j[\text{min}]$	n_j	s_j
1	0	-95040	2	1	53	0	25920	4	1
2	0	-95040	2	1	54	0	76320	4	1
3	0	-95040	2	1	55	0	76320	4	1
4	0	-84960	2	1	56	0	86400	4	1
5	0	-84960	2	1	57	0	96480	4	1
6	0	-84960	2	1	58	0	66240	4	1
7	0	-84960	2	1	59	0	76320	4	1
8	0	-95040	2	1	60	0	96480	4	1
9	0	-84960	3	1	61	0	56160	3	1
10	0	15840	2	1	62	0	66240	3	1
11	0	25920	2	1	63	0	76320	3	1
12	0	37440	2	1	64	0	86400	3	1
13	0	46080	2	1	65	0	96480	3	1
14	0	56160	2	1	66	0	106560	3	1
15	0	-110880	2	1	67	0	116640	3	1
16	0	-34560	2	1	68	0	116640	4	1
17	0	-84960	2	1	69	0	116640	4	1
18	0	-14400	1	1	70	0	84960	4	1
19	0	-15840	1	1	71	0	84960	4	1
20	0	24480	5	1	72	0	106560	4	1
21	0	-15840	1	1	73	0	106560	4	1
22	0	-15840	2	1	74	0	144000	4	1
23	0	24480	7	1	75	0	36000	3	1
24	0	24480	4	1	76	0	10080	2	1
25	0	15840	1	1	77	0	31680	4	1
26	0	25920	1	1	78	0	31680	4	1
27	0	36000	1	1	79	0	-115200	2	1
28	0	46080	1	1	80	0	41760	1	1
29	0	-14400	1	1	81	0	-100800	3	1
30	0	5760	1	1	82	0	-10080	2	1
31	0	5760	1	1	83	0	-115200	2	1
32	0	12960	2	1	84	0	-125280	2	1
33	0	12960	2	1	85	0	-125280	1	1
34	0	-14400	2	1	86	0	-115200	2	1
35	0	15840	2	1	87	0	-115200	2	1
36	0	4320	3	1	88	0	-105120	2	1
37	0	15840	4	1	89	0	-105120	2	1
38	0	66240	4	1	90	0	-95040	2	1
39	0	-34560	2	1	91	0	-95040	2	1
40	0	-34560	2	1					
41	0	-34560	2	1					
42	0	-4320	1	1					
43	0	-184320	2	1					
44	0	-236160	2	1					
45	0	144000	3	1					
46	0	11520	1	1					
47	0	46080	5	1					
48	0	0	5	1					
49	0	40320	4	1					
50	0	11520	2	1					
51	0	25920	4	1					
52	0	76320	4	1					

<i>j</i>	<i>i</i>	$p_{i,j}$ [min]	$m_{i,j}$	$st_{i,j}$ [min]	<i>j</i>	<i>i</i>	$p_{i,j}$ [min]	$m_{i,j}$	$st_{i,j}$ [min]
1	1	40	1	120	30	1	2992	9	150
1	2	26	1	120	31	1	600	7	60
2	1	50	1	120	32	1	3000	8	100
2	2	32	1	120	32	2	6000	9	65
3	1	35	1	120	33	1	2000	8	105
3	2	23	1	120	33	2	2000	10	55
4	1	31	1	120	34	1	579	8	45
4	2	46	1	90	34	2	1500	9	100
5	1	23	1	120	35	1	2075	8	55
5	2	38	1	90	35	2	1941	9	45
6	1	40	1	120	36	1	50	7	80
6	2	26	1	120	36	2	375	7	55
7	1	50	1	120	36	3	100	7	70
7	2	22	1	120	37	1	10	7	10
8	1	35	1	120	37	2	190	7	250
8	2	23	1	120	37	3	180	7	190
9	1	111	2	120	37	4	70	7	70
9	2	126	2	90	38	1	30	7	0
9	3	240	3	0	38	2	380	7	250
10	1	250	4	270	38	3	360	7	190
10	2	70	4	240	38	4	140	7	70
11	1	370	4	360	39	1	200	11	105
11	2	100	4	330	39	2	125	11	75
12	1	370	4	360	40	1	1500	2	130
12	2	100	4	330	40	2	1500	2	70
13	1	370	4	360	41	1	32	1	75
13	2	100	4	330	41	2	16	1	75
14	1	370	4	360	42	1	470	3	470
14	2	100	4	330	43	1	340	2	75
15	1	15	2	60	43	2	170	2	45
15	2	15	2	60	44	1	1064	2	135
16	1	3810	2	7530	44	2	164	2	135
16	2	2560	2	3765	45	1	45	2	60
17	1	50	1	120	45	2	100	2	55
17	2	26	1	60	45	3	150	5	0
18	1	242	3	60	46	1	200	3	200
19	1	480	5	0	47	1	1200	6	105
20	1	600	6	15	47	2	600	6	75
20	2	300	6	105	47	3	1200	6	130
20	3	300	6	75	47	4	1200	6	10
20	4	480	5	0	47	5	4800	8	90
20	5	420	7	100	48	1	440	1	70
21	1	720	5	0	48	2	330	1	55
22	1	840	5	0	48	3	3850	8	90
22	2	300	8	60	48	4	1320	12	70
23	1	300	6	15	48	5	660	12	40
23	2	300	6	150	49	1	3420	2	75
23	3	300	6	75	49	2	2280	2	75
23	4	300	6	120	49	3	1140	6	55
23	5	720	5	0	49	4	1710	3	75
23	6	360	7	50	50	1	3000	8	100
23	7	360	8	60	50	2	500	7	75
24	1	1400	7	100	51	1	300	12	135
24	2	560	7	55	51	2	330	12	150
24	3	1020	5	0	51	3	330	12	150
24	4	560	7	100	51	4	45	12	90
25	1	150	6	50	52	1	300	7	135
26	1	150	6	50	52	2	330	12	150
27	1	150	6	50	52	3	330	12	150
28	1	150	6	50	52	4	45	12	90
29	1	3000	9	150	53	1	140	7	150

<i>j</i>	<i>i</i>	$p_{i,j}[\text{min}]$	$m_{i,j}$	$st_{i,j}[\text{min}]$	<i>j</i>	<i>i</i>	$p_{i,j}[\text{min}]$	$m_{i,j}$	$st_{i,j}[\text{min}]$
53	1	140	7	150	70	2	300	12	90
53	2	200	12	60	70	3	390	12	150
53	3	260	12	150	70	4	45	12	30
53	4	30	12	75	71	1	300	7	135
54	1	210	7	150	71	2	330	12	150
54	2	300	12	90	71	3	330	12	150
54	3	390	12	150	71	4	45	12	90
54	4	45	12	30	72	1	210	7	150
55	1	630	7	150	72	2	300	12	90
55	2	930	12	87	72	3	390	12	150
55	3	1170	12	150	72	4	45	12	30
55	4	135	12	75	73	1	300	7	135
56	1	630	7	150	73	2	330	12	150
56	2	930	12	87	73	3	330	12	150
56	3	1170	12	150	73	4	45	12	90
56	4	135	12	75	74	1	7898	6	100
57	1	315	7	150	74	2	4513	10	25
57	2	480	12	74	74	3	1880	7	55
57	3	585	12	150	74	4	4513	9	25
57	4	68	12	75	75	1	90	2	615
58	1	900	12	135	75	2	730	2	715
58	2	900	12	90	75	3	215	13	215
58	3	990	12	150	76	1	1140	3	210
58	4	135	12	75	76	2	2280	3	200
59	1	900	7	135	77	1	200	12	135
59	2	900	12	90	77	2	220	12	150
59	3	990	12	150	77	3	220	12	150
59	4	135	12	75	77	4	30	12	30
60	1	450	7	135	78	1	140	7	150
60	2	450	12	90	78	2	200	12	90
60	3	495	12	150	78	3	260	12	150
60	4	68	12	75	78	4	60	12	45
61	1	158	6	130	79	1	1500	2	130
61	2	158	6	100	79	2	1500	2	70
61	3	158	6	50	80	1	8000	11	190
62	1	158	6	130	81	1	2400	2	0
62	2	158	6	100	81	2	600	2	40
62	3	158	6	50	81	3	4800	7	135
63	1	158	6	130	82	1	1800	4	190
63	2	158	6	100	82	2	1200	14	130
63	3	158	6	50	83	1	155	1	0
64	1	158	6	130	83	2	2	1	40
64	2	158	6	100	84	1	30	1	150
64	3	158	6	50	84	2	18	1	130
65	1	158	6	130	85	1	18	13	130
65	2	158	6	100	86	1	155	1	0
65	3	158	6	50	86	2	2	1	40
66	1	180	6	130	87	1	155	1	0
66	2	180	6	100	87	2	2	1	40
66	3	180	6	50	88	1	40	1	150
67	1	180	6	130	88	2	16	1	40
67	2	180	6	100	89	1	10	1	150
67	3	180	6	50	89	2	4	1	40
68	1	630	7	150	90	1	5	1	150
68	2	930	12	87	90	2	3	1	140
68	3	1170	12	150	91	1	5	1	150
69	1	900	7	135	91	2	3	1	140
69	2	900	12	90					
69	3	990	12	150					
69	4	135	12	75					
70	1	210	7	150					

	ERD/FIFO	MDD	EDD	Min. Slack	SSPT	Slack/NOP	CR
Tempo de execução do sistema [s]	2,52	6,00	2,46	6,00	2,46	6,00	5,88
Número de decisões ¹⁵	108	104	104	105	109	105	102
Número médio de operações selecionáveis por decisão ¹⁵	7,76	7,97	7,97	8,02	7,21	8,01	8,02
\bar{C} [min]	10837,59	10827,86	11063,87	11355,86	76665,43	11831,45	12551,96
\bar{W} [min]	9071,87	9062,13	9298,14	9590,13	5899,70	10065,73	10786,23
\bar{F} [min]	10837,59	10827,86	11063,87	11355,86	7665,43	11831,45	12551,96
\bar{L} [min]	9587,48	9577,75	9813,76	10105,75	6415,32	10581,34	11301,85
\bar{T} [min]	34940,10	33272,41	33568,10	33582,07	34018,30	33590,81	33376,34
\bar{E} [min]	25352,62	23694,66	23754,34	23476,32	27602,98	23009,47	22074,49
C_{max} [min]	42890,00	40680,00	40680,00	39234,00	38090,00	39234,00	38530,00
W_{max} [min]	35090,00	37945,00	37945,00	37945,00	31720,00	37945,00	37945,00
F_{max} [min]	42890,00	40680,00	40680,00	39234,00	38090,00	39234,00	38530,00
L_{max} [min]	259750,00	238885,00	237658,00	237658,00	241295,00	237658,00	238438,00
T_{max} [min]	259750,00	238885,00	237658,00	237658,00	241295,00	237658,00	238438,00
E_{max} [min]	120000,00	111032,00	111411,00	111411,00	143370,00	112799,00	119016,00
Percentagem de ordens de fabrico atrasadas	43,96%	43,96%	46,15%	46,15%	43,96%	46,15%	46,15%
\bar{TS} [min]	2725,71	2725,71	2725,71	2725,71	2725,71	2725,71	2725,71
\bar{TD} [min]	10200,57	11644,43	11464,07	11633,07	6158,07	11292,21	10564,57
\bar{TTI} [min]	12926,29	14370,14	14189,79	14358,79	8883,79	14017,93	13290,29
TS_{max} [min]	14050,00	14050,00	14050,00	14050,00	14050,00	14050,00	14050,00
TD_{max} [min]	31487,00	33830,00	33830,00	37467,00	19603,00	37467,00	37467,00
TTI_{max} [min]	31832,00	34398,00	34398,00	37812,00	19683,00	37812,00	37812,00
Percentagem global de tempo total improdutivo	52,97%	55,60%	55,28%	55,58%	43,63%	54,98%	53,66%

¹⁵Considera-se decisão a seleção, através de regras de prioridade, de uma próxima operação a calendarizar.

ANEXO B: problema P2

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$d_k[\text{min}]$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

j	$r_j[\text{min}]$	$D_j[\text{min}]$	n_j	s_j	j	$r_j[\text{min}]$	$D_j[\text{min}]$	n_j	s_j
1	0	-115200	2	1	53	0	96480	4	1
2	0	-105120	2	1	54	0	64800	4	1
3	0	-105120	2	1	55	0	64800	4	1
4	0	-105120	1	1	56	0	86400	4	1
5	0	-105120	1	1	57	0	86400	4	1
6	0	-115200	2	1	58	0	86400	4	1
7	0	-105120	1	1	59	0	15840	3	1
8	0	17280	2	1	60	0	15840	2	1
9	0	25920	2	1	61	0	31680	3	1
10	0	36000	2	1	62	0	126720	3	1
11	0	-131040	1	1	63	0	126720	1	1
12	0	-36000	1	1	64	0	11520	2	1
13	0	4320	5	1	65	0	73440	2	1
14	0	-36000	1	1	66	0	82080	2	1
15	0	-36000	2	1	67	0	93600	2	1
16	0	4320	2	1	68	0	103680	2	1
17	0	4320	2	1	69	0	123840	2	1
18	0	-14400	1	1	70	0	56160	6	1
19	0	-14400	1	1	71	0	36000	2	1
20	0	-7200	2	1	72	0	36000	2	1
21	0	-7200	2	1	73	0	36000	2	1
22	0	-34560	1	1	74	0	36000	3	1
23	0	-4320	2	1	75	0	-135360	2	1
24	0	-4320	4	1	76	0	21600	1	1
25	0	46080	4	1	77	0	-120960	3	1
26	0	-54720	2	1	78	0	-145440	1	1
27	0	-54720	2	1	79	0	-135360	2	1
28	0	-204480	2	1	80	0	-125280	1	1
29	0	-256320	2	1	81	0	-125280	1	1
30	0	123840	3	1					
31	0	25920	5	1					
32	0	-20160	5	1					
33	0	20160	4	1					
34	0	-8640	1	1					
35	0	5760	1	1					
36	0	56160	4	1					
37	0	5760	2	1					
38	0	56160	3	1					
39	0	56160	3	1					
40	0	66240	4	1					
41	0	76320	4	1					
42	0	46080	2	1					
43	0	56160	4	1					
44	0	76320	4	1					
45	0	36000	3	1					
46	0	46080	3	1					
47	0	56160	3	1					
48	0	66240	3	1					
49	0	76320	3	1					
50	0	86400	3	1					
51	0	96480	3	1					
52	0	96480	4	1					

<i>j</i>	<i>i</i>	$p_{i,j}$ [min]	$m_{i,j}$	$st_{i,j}$ [min]	<i>j</i>	<i>i</i>	$p_{i,j}$ [min]	$m_{i,j}$	$st_{i,j}$ [min]
1	1	40	13	120	31	3	1210	2	120
1	2	26	13	120	31	4	1200	2	10
2	1	31	13	120	31	5	4830	8	60
2	2	46	13	90	32	1	450	12	60
3	1	23	13	120	32	2	340	12	45
3	2	38	13	90	32	3	3880	8	60
4	1	26	13	120	32	4	1330	7	60
5	1	22	13	120	32	5	670	7	30
6	1	35	13	120	33	1	3435	11	60
6	2	23	13	120	33	2	2295	10	60
7	1	240	6	0	33	3	1155	2	45
8	1	640	11	90	33	4	1725	6	60
8	2	370	11	60	34	1	1725	8	60
9	1	640	11	90	35	1	75	7	60
9	2	370	11	60	36	1	315	3	120
10	1	640	11	90	36	2	360	7	120
10	2	370	11	60	36	3	360	7	120
11	1	15	6	60	36	4	75	7	60
12	1	480	9	0	37	1	170	3	120
13	1	600	4	15	37	2	60	7	45
13	2	315	4	90	38	1	330	7	60
13	3	315	4	60	38	2	420	7	120
13	4	480	9	0	38	3	45	7	30
13	5	430	3	90	39	1	930	7	87
14	1	720	9	0	39	2	1200	7	120
15	1	840	9	0	39	3	165	7	45
15	2	330	8	30	40	1	660	3	120
16	1	720	9	0	40	2	930	7	87
16	2	330	8	30	40	3	1170	7	150
17	1	1020	9	0	40	4	165	7	45
17	2	570	3	90	41	1	345	3	120
18	1	3052	2	90	41	2	480	7	74
19	1	610	3	50	41	3	615	7	120
20	1	3010	8	90	41	4	98	7	45
20	2	6015	4	50	42	1	1020	7	120
21	1	2015	8	90	42	2	165	7	45
21	2	2010	5	45	43	1	915	3	120
22	1	579	8	45	43	2	930	7	60
23	1	2085	8	45	43	3	1020	7	120
23	2	1941	3	45	43	4	165	7	45
24	1	10	3	10	44	1	465	3	120
24	2	200	3	240	44	2	480	7	60
24	3	190	3	180	44	3	525	7	120
24	4	80	3	60	44	4	98	7	45
25	1	30	3	0	45	1	168	2	120
25	2	390	3	240	45	2	168	2	90
25	3	370	3	180	45	3	168	2	40
25	4	150	3	60	46	1	168	2	120
26	1	215	12	90	46	2	168	2	90
26	2	140	12	60	46	3	168	2	40
27	1	1510	10	120	47	1	168	2	120
27	2	1510	10	60	47	2	168	2	90
28	1	355	10	60	47	3	168	2	40
28	2	185	10	30	48	1	168	2	120
29	1	1079	10	120	48	2	168	2	90
29	2	179	10	120	48	3	168	2	40
30	1	45	10	60	49	1	168	2	120
30	2	110	10	45	49	2	168	2	90
30	3	150	9	0	49	3	168	2	40
31	1	1245	2	60	50	1	190	2	120
31	2	615	2	60	50	2	190	2	90

<i>j</i>	<i>i</i>	$p_{i,j}[\text{min}]$	$m_{i,j}$	$st_{i,j}[\text{min}]$	<i>j</i>	<i>i</i>	$p_{i,j}[\text{min}]$	$m_{i,j}$	$st_{i,j}[\text{min}]$
50	3	190	2	40	70	6	760	3	1530
51	1	190	2	120	71	1	90	13	1550
51	2	190	2	90	71	2	74	13	120
51	3	190	2	40	72	1	90	13	120
52	1	660	3	120	72	2	46	13	120
52	2	930	7	87	73	1	51	13	60
52	3	1200	7	120	73	2	33	13	60
52	4	45	7	0	74	1	66	11	180
53	1	915	3	120	74	2	26	11	45
53	2	930	7	60	74	3	18	9	30
53	3	1020	7	120	75	1	1510	10	120
53	4	165	7	45	75	2	1510	10	60
54	1	240	3	120	76	1	8010	12	180
54	2	330	7	60	77	1	2460	10	120
54	3	420	7	12	77	2	615	10	45
54	4	45	7	30	77	3	4815	3	120
55	1	315	3	120	78	1	4815	1	120
55	2	360	7	120	79	1	155	13	0
55	3	360	7	120	79	2	12	13	30
55	4	75	7	60	80	1	26	13	30
56	1	240	3	120	81	1	14	13	30
56	2	330	7	60					
56	3	420	7	120					
56	4	45	7	30					
57	1	315	3	120					
57	2	360	7	120					
57	3	360	7	120					
57	4	75	7	60					
58	1	7908	4	90					
58	2	4523	5	60					
58	3	1890	3	45					
58	4	4528	4	10					
59	1	90	10	615					
59	2	730	10	715					
59	3	215	1	215					
60	1	40	13	120					
60	2	26	13	120					
61	1	480	11	15					
61	2	3660	8	120					
61	3	150	3	45					
62	1	420	11	15					
62	2	3060	8	120					
62	3	130	3	45					
63	1	30	7	30					
64	1	170	3	120					
64	2	60	7	45					
65	1	370	11	360					
65	2	100	11	330					
66	1	410	11	390					
66	2	110	11	360					
67	1	410	11	390					
67	2	110	11	360					
68	1	410	11	390					
68	2	110	11	360					
69	1	119	12	180					
69	2	134	12	120					
70	1	100	3	30					
70	2	1010	3	6060					
70	3	760	3	6060					
70	4	515	10	4560					
70	5	510	3	6060					

	ERD/FIFO	MDD	EDD	Min. Slack	SSPT	Slack/NOP	CR
Tempo de execução do sistema [s]	2,22	4,50	2,10	4,44	2,10	4,38	4,44
Número de decisões ¹⁶	101	96	97	98	100	96	96
Número médio de operações selecionáveis por decisão ¹⁶	6,49	6,43	6,51	6,81	7,16	6,71	6,90
\bar{C} [min]	10655,54	12180,32	13189,06	14490,01	11220,38	13480,41	14989,94
\bar{W} [min]	8777,58	10302,36	11311,10	12612,05	9342,42	11602,44	13111,98
\bar{F} [min]	10655,54	12180,32	13189,06	14490,01	11220,38	13480,41	14989,94
\bar{L} [min]	5553,32	7078,10	8086,84	9387,79	6118,16	8378,19	9887,72
\bar{T} [min]	33801,06	32038,55	32181,52	32652,09	33865,77	32507,27	32853,05
\bar{E} [min]	28247,74	24960,46	24094,68	23264,30	27747,61	24129,09	22965,33
C_{max} [min]	43621,00	51101,00	54197,00	54097,00	44415,00	48734,00	53685,00
W_{max} [min]	40011,00	48071,00	51167,00	51067,00	40760,00	45688,00	52650,00
F_{max} [min]	43621,00	51101,00	54197,00	54097,00	44415,00	48734,00	53685,00
L_{max} [min]	261648,00	258448,00	257818,00	257818,00	260858,00	257818,00	258448,00
T_{max} [min]	261648,00	258448,00	257818,00	257818,00	260858,00	257818,00	258448,00
E_{max} [min]	121887,00	121413,00	113697,00	115588,00	126660,00	115461,00	116916,00
Percentagem de ordens de fabrico atrasadas	44,44%	38,27%	41,98%	40,74%	44,44%	39,51%	45,68%
\bar{TS} [min]	3457,85	3457,85	3457,85	3457,85	3457,85	3457,85	3457,85
\bar{TD} [min]	4511,69	8400,23	9483,54	8615,23	4696,00	8374,85	8008,08
\bar{TTI} [min]	7969,54	11858,08	12941,38	12073,08	8153,85	11832,69	11465,92
TS_{max} [min]	22800,00	22800,00	22800,00	22800,00	22800,00	22800,00	22800,00
TD_{max} [min]	17313,00	26567,00	29663,00	29144,00	16267,00	28738,00	28732,00
TTI_{max} [min]	22800,00	29660,00	32756,00	32656,00	23594,00	29053,00	32244,00
Percentagem global de tempo total improdutivo	40,51%	50,33%	52,52%	50,78%	41,07%	50,28%	49,49%

¹⁶Considera-se decisão a seleção, através de regras de prioridade, de uma próxima operação a calendarizar.

ANEXO C: problema P3

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$d_k[\text{min}]$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

j	$r_j[\text{min}]$	$D_j[\text{min}]$	n_j	s_j	j	$r_j[\text{min}]$	$D_j[\text{min}]$	n_j	s_j
1	0	-115200	2	1	53	0	72000	2	1
2	0	-115200	2	1	54	0	83520	2	1
3	0	7200	2	1	55	0	93600	2	1
4	0	15840	2	1	56	0	113760	2	1
5	0	25920	2	1	57	0	46080	6	1
6	0	-141120	1	1	58	0	25920	2	1
7	0	-46080	1	1	59	0	25920	2	1
8	0	-5760	1	1	60	0	25920	2	1
9	0	-46080	1	1	61	0	25920	3	1
10	0	-46080	1	1	62	0	11520	2	1
11	0	-5760	2	1	63	0	11520	2	1
12	0	-5760	1	1	64	0	76320	2	1
13	0	-24480	1	1	65	0	-145440	2	1
14	0	-24480	1	1	66	0	-131040	3	1
15	0	-17280	2	1	67	0	-155520	1	1
16	0	-17280	2	1					
17	0	-14400	1	1					
18	0	-14400	4	1					
19	0	36000	4	1					
20	0	-64800	2	1					
21	0	-214560	2	1					
22	0	-266400	2	1					
23	0	-266400	3	1					
24	0	15840	5	1					
25	0	10080	4	1					
26	0	10080	3	1					
27	0	46080	1	1					
28	0	46080	1	1					
29	0	56160	3	1					
30	0	66240	3	1					
31	0	36000	2	1					
32	0	46080	3	1					
33	0	46080	3	1					
34	0	25920	3	1					
35	0	36000	3	1					
36	0	46080	3	1					
37	0	56160	3	1					
38	0	66240	3	1					
39	0	76320	3	1					
40	0	86400	3	1					
41	0	86400	3	1					
42	0	86400	3	1					
43	0	54720	3	1					
44	0	54720	3	1					
45	0	76320	3	1					
46	0	76320	3	1					
47	0	76320	3	1					
48	0	113760	4	1					
49	0	531360	3	1					
50	0	21600	3	1					
51	0	116640	3	1					
52	0	63360	2	1					

j	i	$p_{ij}[\text{min}]$	m_{ij}	$st_{ij}[\text{min}]$	j	i	$p_{ij}[\text{min}]$	m_{ij}	$st_{ij}[\text{min}]$
1	1	16	14	135	30	3	68	7	75
1	2	16	14	120	31	1	990	7	150
2	1	8	14	135	31	2	135	7	75
2	2	8	14	120	32	1	900	7	90
3	1	370	12	360	32	2	990	7	150
3	2	100	12	330	32	3	135	7	75
4	1	370	12	360	33	1	450	7	90
4	2	100	12	330	33	2	495	7	150
5	1	370	12	360	33	3	68	7	75
5	2	100	12	330	34	1	158	2	130
6	1	15	3	60	34	2	158	2	100
7	1	480	10	0	34	3	158	2	50
8	1	480	10	0	35	1	158	2	130
9	1	720	10	0	35	2	158	2	100
10	1	840	10	0	35	3	158	2	50
11	1	720	10	0	36	1	158	2	130
11	2	300	9	60	36	2	158	2	100
12	1	1020	10	0	36	3	158	2	50
13	1	2992	2	150	37	1	158	2	130
14	1	600	3	60	37	2	158	2	100
15	1	3000	8	100	37	3	158	2	50
15	2	6000	3	65	38	1	158	2	130
16	1	2000	8	105	38	2	158	2	100
16	2	2000	5	55	38	3	158	2	50
17	1	1941	3	45	39	1	180	2	130
18	1	10	3	10	39	2	180	2	100
18	2	190	3	240	39	3	180	2	50
18	3	180	3	190	40	1	180	2	130
18	4	70	3	70	40	2	180	2	100
19	1	30	3	0	40	3	180	2	50
19	2	380	3	250	41	1	930	2	87
19	3	360	3	190	41	2	1170	2	150
19	4	140	3	70	41	3	135	2	75
20	1	200	13	105	42	1	900	2	90
20	2	125	13	75	42	2	990	2	150
21	1	340	11	75	42	3	135	2	75
21	2	170	11	45	43	1	300	2	90
22	1	1064	11	135	43	2	390	2	150
22	2	164	11	135	43	3	45	2	30
23	1	45	11	60	44	1	330	2	150
23	2	100	11	55	44	2	330	2	150
23	3	150	10	0	44	3	45	2	90
24	1	1200	2	105	45	1	300	7	90
24	2	600	2	75	45	2	390	7	150
24	3	1200	2	130	45	3	45	7	30
24	4	1200	2	10	46	1	330	7	150
24	5	4800	8	90	46	2	390	7	150
25	1	3420	11	75	46	3	45	7	90
25	2	2280	11	75	47	1	330	7	150
25	3	1140	2	60	47	2	390	7	150
25	4	1710	6	75	47	3	45	7	90
26	1	330	7	150	48	1	7898	5	100
26	2	330	7	150	48	2	4513	5	70
26	3	45	7	90	48	3	1880	3	55
27	1	45	7	30	48	4	4513	4	25
28	1	135	7	75	49	1	90	11	615
29	1	930	7	87	49	2	730	11	715
29	2	1170	7	150	49	3	215	3	215
29	3	135	7	75	50	1	90	11	615
30	1	480	7	74	50	2	730	11	715
30	2	585	7	150	50	3	215	3	215

j	i	$p_{i,j}[\text{min}]$	$m_{i,j}$	$st_{i,j}[\text{min}]$
51	1	300	12	135
51	2	3000	9	180
51	3	100	3	75
52	1	370	12	360
52	2	100	12	330
53	1	410	12	390
53	2	110	12	360
54	1	410	12	390
54	2	110	12	360
55	1	410	12	390
55	2	110	12	360
56	1	104	13	195
56	2	104	13	150
57	1	100	3	30
57	2	1010	3	6060
57	3	760	3	6060
57	4	415	11	4560
57	5	510	3	6060
57	6	760	3	1530
58	1	90	14	1550
58	2	54	14	140
59	1	60	14	150
59	2	36	14	130
60	1	36	14	75
60	2	18	14	75
61	1	56	14	190
61	2	16	14	55
61	3	18	10	30
62	1	565	4	0
62	2	280	4	0
63	1	800	11	195
63	2	200	11	135
64	1	2320	11	160
64	2	2320	11	160
65	1	1500	11	130
65	2	1500	11	70
66	1	2400	11	180
66	2	600	11	60
66	3	4800	3	135
67	1	155	1	4260

	ERD/FIFO	MDD	EDD	Min. Slack	SSPT	Slack/NOP	CR
Tempo de execução do sistema [s]	1,74	2,82	1,74	2,88	1,74	2,76	2,76
Número de decisões ¹⁷	66	66	66	66	65	66	66
Número médio de operações selecionáveis por decisão ¹⁷	5,62	5,39	5,52	5,61	5,72	5,65	5,48
\bar{C} [min]	9410,21	10066,99	10812,64	11447,16	8014,00	12067,66	11501,43
\bar{W} [min]	7715,34	8372,12	9117,78	9752,30	6319,13	10372,79	9806,57
\bar{F} [min]	9410,21	10066,99	10812,64	11447,16	8014,00	12067,66	11501,43
\bar{L} [min]	-4667,40	-4010,63	-3264,97	-2630,45	-6063,61	-2009,96	-2576,18
\bar{T} [min]	30373,82	29448,39	29882,09	30142,39	31171,64	30299,12	29711,34
\bar{E} [min]	35041,22	33459,02	33147,06	32772,84	37235,25	32309,07	32287,52
C_{max} [min]	41951,00	49121,00	49121,00	49121,00	41951,00	48819,00	47318,00
W_{max} [min]	38396,00	44178,00	44178,00	44178,00	38396,00	43876,00	42375,00
F_{max} [min]	41951,00	49121,00	49121,00	49121,00	41951,00	48819,00	47318,00
L_{max} [min]	270810,00	268788,00	268590,00	268308,00	274418,00	269610,00	268788,00
T_{max} [min]	270810,00	268788,00	268590,00	268308,00	274418,00	269610,00	268788,00
E_{max} [min]	505569,00	486147,00	486147,00	486147,00	514280,00	486449,00	487950,00
Percentagem de ordens de fabrico atrasadas	37,31%	34,33%	35,82%	35,82%	35,82%	37,31%	38,81%
\bar{TS} [min]	3652,36	3652,36	3652,36	3652,36	3652,36	3652,36	3652,36
\bar{TD} [min]	3872,29	6138,50	6074,14	5986,86	4471,00	6050,14	5426,86
\bar{TTI} [min]	7524,64	9790,86	9726,50	9639,21	8123,36	9702,50	9079,21
TS_{max} [min]	21685,00	21685,00	21685,00	21685,00	21685,00	21685,00	21685,00
TD_{max} [min]	27286,00	43738,00	43738,00	43738,00	26333,00	43436,00	41935,00
TTI_{max} [min]	27311,00	43763,00	43763,00	43763,00	26408,00	43461,00	41960,00
Percentagem global de tempo total improdutivo	48,12%	54,69%	54,53%	54,30%	50,04%	54,47%	52,82%

¹⁷Considera-se decisão a seleção, através de regras de prioridade, de uma próxima operação a calendarizar.

ANEXO D: problema P4

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$d_k[\text{min}]$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

j	$r_j[\text{min}]$	$D_j[\text{min}]$	n_j	s_j	j	$r_j[\text{min}]$	$D_j[\text{min}]$	n_j	s_j
1	0	-24480	2	1	53	0	83520	2	1
2	0	-96480	1	1	54	0	83520	3	1
3	0	-56160	1	1	55	0	83520	2	1
4	0	-96480	1	1	56	0	83520	2	1
5	0	-96480	1	1	57	0	83520	2	1
6	0	-56160	1	1	58	0	83520	2	1
7	0	-56160	1	1	59	0	83520	3	1
8	0	-246240	2	1	60	0	83520	3	1
9	0	63360	3	1	61	0	83520	2	1
10	0	-80640	3	1	62	0	83520	2	1
11	0	36000	2	1	63	0	38880	2	1
12	0	36000	2	1					
13	0	25920	1	1					
14	0	63360	2	1					
15	0	66240	4	1					
16	0	12960	2	1					
17	0	12960	2	1					
18	0	33120	2	1					
19	0	43200	2	1					
20	0	-4320	7	1					
21	0	-24480	1	1					
22	0	25920	3	1					
23	0	25920	3	1					
24	0	-24480	2	1					
25	0	-24480	2	1					
26	0	-24480	2	1					
27	0	-24480	2	1					
28	0	15840	2	1					
29	0	15840	2	1					
30	0	36000	2	1					
31	0	36000	2	1					
32	0	-4320	2	1					
33	0	5760	2	1					
34	0	5760	2	1					
35	0	5760	2	1					
36	0	5760	1	1					
37	0	36000	1	1					
38	0	46080	3	1					
39	0	66240	3	1					
40	0	76320	3	1					
41	0	86400	3	1					
42	0	96480	3	1					
43	0	106560	3	1					
44	0	76320	4	1					
45	0	76320	4	1					
46	0	96480	4	1					
47	0	96480	4	1					
48	0	96480	4	1					
49	0	86400	4	1					
50	0	66240	4	1					
51	0	86400	4	1					
52	0	83520	4	1					

<i>j</i>	<i>i</i>	$p_{i,j}$ [min]	$m_{i,j}$	$st_{i,j}$ [min]	<i>j</i>	<i>i</i>	$p_{i,j}$ [min]	$m_{i,j}$	$st_{i,j}$ [min]
1	1	370	1	360	30	1	840	3	190
1	2	100	1	330	30	2	240	3	55
2	1	480	2	0	31	1	2100	1	135
3	1	480	2	0	31	2	1400	1	135
4	1	720	2	0	32	1	410	1	390
5	1	840	2	0	32	2	110	1	360
6	1	720	2	0	33	1	410	1	390
7	1	1020	2	0	33	2	110	1	360
8	1	340	1	75	34	1	600	10	190
8	2	170	1	45	34	2	600	10	130
9	1	45	3	60	35	1	3000	4	100
9	2	100	3	55	35	2	6000	8	65
9	3	150	2	0	36	1	2500	13	105
10	1	3850	4	90	37	1	210	7	70
10	2	1320	5	70	38	1	165	12	130
10	3	660	5	40	38	2	165	12	100
11	1	930	6	87	38	3	165	12	50
11	2	1170	6	150	39	1	165	12	130
12	1	900	6	90	39	2	165	12	100
12	2	990	6	150	39	3	165	12	50
13	1	330	6	150	40	1	165	12	130
14	1	1880	7	55	40	2	165	12	100
14	2	4513	8	25	40	3	165	12	50
15	1	3000	4	180	41	1	165	12	130
15	2	100	7	75	41	2	165	12	100
15	3	1000	7	75	41	3	165	12	50
15	4	50	7	20	42	1	165	12	130
16	1	370	1	360	42	2	165	12	100
16	2	100	1	330	42	3	165	12	50
17	1	410	1	390	43	1	165	12	130
17	2	110	1	360	43	2	165	12	100
18	1	410	1	390	43	3	165	12	50
18	2	110	1	360	44	1	630	6	150
19	1	410	1	390	44	2	930	6	87
19	2	110	1	360	44	3	1170	6	150
20	1	100	7	30	44	4	135	6	75
20	2	1010	7	6060	45	1	900	6	135
20	3	760	7	6060	45	2	900	6	90
20	4	515	3	4560	45	3	990	6	150
20	5	510	7	6060	45	4	135	6	75
20	6	760	7	1530	46	1	630	6	150
20	7	765	3	6060	46	2	930	6	87
21	1	18	2	30	46	3	1170	6	150
22	1	2320	9	160	46	4	135	6	75
22	2	2320	3	160	47	1	900	6	135
22	3	3480	5	85	47	2	900	6	90
23	1	2800	12	15	47	3	990	6	150
23	2	560	12	15	47	4	135	6	75
23	3	560	7	100	48	1	300	6	135
24	1	135	3	55	48	2	330	6	150
24	2	135	3	65	48	3	330	6	150
25	1	1500	10	35	48	4	45	6	90
25	2	900	10	45	49	1	300	6	135
26	1	180	3	55	49	2	330	6	150
26	2	180	3	65	49	3	330	6	150
27	1	135	3	55	49	4	45	6	90
27	2	135	3	65	50	1	300	6	135
28	1	400	9	130	50	2	330	6	150
28	2	75	9	70	50	3	330	6	150
29	1	360	3	55	50	4	45	6	90
29	2	360	3	65	51	1	300	6	135

j	i	$p_{ij}[\text{min}]$	m_{ij}	$st_{ij}[\text{min}]$
51	2	330	6	150
51	3	330	6	150
51	4	45	6	90
52	1	330	7	0
52	2	300	7	135
52	3	300	7	105
52	4	300	7	60
53	1	300	11	105
53	2	300	11	105
54	1	35	12	0
54	2	300	12	135
54	3	200	12	75
55	1	150	7	105
55	2	150	7	105
56	1	240	7	105
56	2	240	7	105
57	1	150	7	75
57	2	150	7	75
58	1	160	7	75
58	2	140	7	75
59	1	200	12	75
59	2	200	12	105
59	3	20	12	75
60	1	300	11	135
60	2	300	11	105
60	3	300	11	60
61	1	300	12	105
61	2	300	12	105
62	1	300	7	105
62	2	300	7	105
63	1	1880	7	55
63	2	4513	7	25

	ERD/FIFO	MDD	EDD	<i>Min. Slack</i>	SSPT	<i>Slack/NOP</i>	CR
Tempo de execução do sistema [s]	1,68	2,46	1,68	2,52	1,68	2,46	2,52
Número de decisões ¹⁸	58	58	58	58	58	58	58
Número médio de operações selecionáveis por decisão ¹⁸	5,55	5,59	5,60	5,60	5,62	5,62	5,62
\bar{C} [min]	9765,41	12384,78	12856,00	13017,89	8451,11	13177,37	13541,35
\bar{W} [min]	8194,16	10813,52	11284,75	11446,63	6879,86	11606,11	11970,10
\bar{F} [min]	9765,41	12384,78	12856,00	13017,89	8451,11	13177,37	13541,35
\bar{L} [min]	-18554,59	-15935,22	-15464,00	-15302,11	-19868,89	-15142,63	-14778,65
\bar{T} [min]	16550,30	15946,60	16173,06	16203,06	16371,13	16203,06	16167,84
\bar{E} [min]	35104,89	31881,83	31637,06	31505,17	36240,02	31345,70	30946,49
C_{max} [min]	38753,00	37988,00	37988,00	37988,00	38753,00	39591,00	37988,00
W_{max} [min]	34333,00	37388,00	37388,00	37688,00	34333,00	37688,00	37688,00
F_{max} [min]	38753,00	37988,00	37988,00	37988,00	38753,00	39591,00	37988,00
L_{max} [min]	248030,00	246870,00	246870,00	246870,00	246870,00	246870,00	246870,00
T_{max} [min]	248030,00	246870,00	246870,00	246870,00	246870,00	246870,00	246870,00
E_{max} [min]	98520,00	96290,00	96290,00	96290,00	100490,00	97100,00	96290,00
Percentagem de ordens de fabrico atrasadas	30,16%	28,57%	30,16%	30,16%	28,57%	30,16%	31,75%
\bar{TS} [min]	3660,08	3660,08	3660,08	3660,08	3660,08	3660,08	3660,08
\bar{TD} [min]	2330,38	6395,00	6588,85	6588,85	3388,46	6808,08	6567,31
\bar{TTI} [min]	5990,46	10055,08	10248,92	10248,92	7048,54	10468,15	10227,38
TS_{max} [min]	21445,00	21445,00	21445,00	21445,00	21445,00	21445,00	21445,00
TD_{max} [min]	20688,00	26138,00	26138,00	26138,00	20688,00	28988,00	25858,00
TTI_{max} [min]	32308,00	26228,00	26228,00	26228,00	32308,00	29078,00	25948,00
Percentagem global de tempo total improdutivo	44,03%	56,91%	57,37%	57,37%	48,07%	57,89%	57,32%

¹⁸Considera-se decisão a seleção, através de regras de prioridade, de uma próxima operação a calendarizar.