

PLANEAMENTO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉCTRICA

Jorge Manuel Mondim Teixeira



Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Área de Especialização de Sistemas e Planeamento Industrial

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2011

Candidato: Jorge Manuel Mondim Teixeira, N° 1030344, 1030344@isep.ipp.pt

Orientação científica: Manuel Pereira Lopes, mpl@isep.ipp.pt



Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Área de Especialização de Sistemas e Planeamento Industrial

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

14 de Novembro de 2011

Dedico à minha namorada, Zélia.

Agradecimentos

Quero agradecer à minha família e amigos, por todo o apoio que me deram, mesmo nos momentos mais complicados, durante estes últimos anos.

Não posso deixar de agradecer à minha namorada pela ajuda preciosa que me deu sempre.

Ao meu Orientador que sempre esteve disponível para me ajudar a solucionar e a ultrapassar as diversas dificuldades encontradas.

A todos, o meu obrigado!

Resumo

O objectivo deste trabalho é otimizar o planeamento de produção tendo como meta a redução do custo total da energia eléctrica consumida.

Este trabalho está dividido em 3 etapas distintas: na 1ª etapa foi feito um levantamento do problema, das restrições do mesmo e da escolha do modelo para a sua resolução. Na etapa seguinte, fez-se a escolha da ferramenta a usar, que foi o *Xpress*, e fez-se a implementação do problema nessa mesma ferramenta. E por fim, na 3ª etapa, foi feita a validação do modelo e análise das soluções obtidas com comparações com que o era feito antes.

Recorrendo a programação inteira foi desenvolvido um modelo de optimização para atingir o objectivo em causa e consequentemente foi escrito o código que reflectisse o modelo matemático.

Todos os passos necessários à sua implementação foram concluídos e validados com comparação com o que antes se fazia, notando-se assim melhorias ao nível de eficiência energética na ordem dos 8%, mas também uma melhoria no aproveitamento de recursos humanos e tempo que eram despendidos para desenvolver planos de produção de forma manual. Essa melhoria temporal que se compreende entre quatro a seis horas semanais pode ser aplicada noutras actividades da empresa com maior valor acrescentado.

Palavras-Chave

Racionalização, Investigação Operacional, *Solver*, *Xpress*, Planeamento, Energia Eléctrica.

Abstract

The main objective of this work is optimizing the planning of the production having as aim the reduction of the total cost of the electric energy spent.

This work is divided in three distinct steps: in the first step was made a survey of the problem, of the restrictions, and the choice of a model to achieve its resolution. In the next step was made the choice of the tool to use, and it was the Xpress that was chosen, and it was made the implementation of the problem inside the Xpress. At last, in the third step was made the validation of the model and the analysis of the solutions that were got, and the balance with what was done before.

Using the integer programming optimization model was developed to fully achieve the main purpose of the problem and so a code was obtained that could reflect a mathematical model.

All the steps needed in the implementation were concluded and validated with the balance with what was made before. We can verify improvements in the energetic efficiency level in 8% range, but also an improvement in the development of the human resources and time spent in comparison of what were spent to build up the handmade production plans. This time spare that is measured between four and six working hours can be applied in other activities more profitable to the firm.

Keywords

Rationalization, Operational Research, Solver, Xpress, Planning, Electric Power.

Índice

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XI
ACRÓNIMOS.....	XIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2. OBJECTIVOS.....	3
1.3. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	3
2. DESCRIÇÃO E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	5
2.1. DESCRIÇÃO DO PROCESSO	6
2.2. COMO ERA FEITO O PLANEAMENTO.....	9
2.3. SOLUÇÃO PROPOSTA.....	10
2.4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA.....	16
3. IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS COMPUTACIONAIS	19
3.1. IMPLEMENTAÇÃO.....	19
3.2. VALIDAÇÃO DO MODELO	23
4. CONCLUSÕES.....	30
REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS	32
ANEXO A. QUADRO DA RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIAS E CAUDAIS	33
ANEXO B. CÓDIGO ESCRITO NO <i>XPRESS</i>.....	34
ANEXO C. EXEMPLO DE FICHEIRO "AUXILIAR.DAT"	42

Índice de Figuras

Figura 1 Esquemático das Instalações	6
Figura 2 Distribuição do Ciclo horário ao longo da semana	8
Figura 3 Procura de Produto por cada período	20
Figura 4 Saída de dados do <i>Xpress</i>	21
Figura 5 Resumo dos cálculos e resultados do <i>Xpress</i>	22
Figura 6 Caudais do Compressor#1 em todos os períodos.....	22

Índice de Tabelas

Tabela 1 Horário Eléctrico	8
Tabela 2 Quadro Relação potências/caudais	11
Tabela 3 Resultado do <i>Xpress</i> com os caudais do Compressor#1.....	23
Tabela 4 Comparação de resultados para uma semana – Simulação 1	24
Tabela 5 Comparação de resultados para uma semana – Simulação 2	25
Tabela 6 Comparação de resultados para quatro semanas – Simulação 1.....	25
Tabela 7 Comparação de resultados para quatro semanas – Simulação 2.....	26
Tabela 8 Comparação de resultados para quatro semanas – Simulação 3.....	26
Tabela 9 Comparação de resultados para quatro semanas – Simulação 4.....	27
Tabela 10 Comparação de resultados para quatro semanas – Simulação 5.....	27
Tabela 11 Comparação de resultados para quatro semanas – Simulação 6.....	28
Tabela 12 – Resumo das simulações efectuadas	28

Acrónimos

CON – Custo Energético por cada período

EDP – Energias de Portugal

PIT_O – Produto Inicial em Tanque de O

PIT_N – Produto Inicial em Tanque de N

PP_O – Procura no Período de O

PP_N – Procura no Período de N

PT_O – Produto em Tanque de O

NM – Nível Mínimo

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A mudança organizacional é vista como sendo um tema de extrema relevância. Atravessamos uma fase de grandes mudanças organizacionais, tanto ao nível dos processos de gestão, dos procedimentos e organização do trabalho, como das estruturas organizacionais, das mudanças na relação clientes/mercado relacionadas com processos de crescente liberalização, maior competição global.

Já nos últimos anos as organizações têm-se modificado de forma acelerada e essas modificações devem-se a causas internas e externas, tais como a crise mundial e a entrada em cena de novas economias.

Todas estas alterações geraram grandes transformações nas organizações que actuam num mercado imprevisível, mercado eléctrico, que tem como particularidade a turbulência provocada pela agitação provocada pela concorrência.

Nas últimas décadas temos vivido num mercado eléctrico monopolista. Contudo as mudanças organizacionais apontam para um mercado de electricidade competitivo, baseado nas leis de oferta e procura. No que concerne ao transporte e à sua distribuição, as redes, por razões físicas, acabam por se converterem em monopólios naturais.

Devido à liberação desse mercado, as organizações são obrigadas a alterar o seu funcionamento de forma considerável. Ou seja, trata-se de encarar a ameaça da concorrência como uma oportunidade de crescimento. [2]

A espanhola *Fortia Energía* iniciou em 2010 a sua actividade económica em Portugal e tem como objectivo alcançar os grandes consumidores industriais de electricidade. A percentagem do consumo dessas empresas é de 48% do consumo nacional, o que as torna um alvo muito atractivo. A liberalização do sector eléctrico tem como consequência uma maior competição entre os comercializadores de energia.

Desde 2010 que entram no mercado nacional novos operadores que prometem ser também uma séria ameaça aos fornecedores de electricidade já instalados no mercado liberalizado, como a EDP ou as espanholas *Iberdrola*, *Endesa* ou *Unión Fenosa*.

Ao conquistar a conta da Siderurgia Nacional-Produtos Longos, na Maia, a *Fortia* deu um passo fundamental na aquisição dos maiores consumidores nacionais. Com baixos custos de operação, a *Fortia* opera como uma central de compras, que agrega grandes empresas industriais. Essas empresas, que representam perto de 13% do consumo eléctrico de alta tensão, criam em 2007 uma associação para fazer frente ao desaparecimento das tarifas eléctricas reguladas para os grandes consumidores. [3] [4]

A *Fortia* comercializa a energia eléctrica por previsões de consumo. Isto significa que tem de existir um planeamento rigoroso do consumo que se pretende efectuar para não haver o risco de penalizações por consumo excedente nem por perdas por consumo não efectuado de energia eléctrica comprada.

No caso deste trabalho esta previsão tem de ser semanal, tendo como dados as previsões de necessidades de produto para os clientes e as existências de produtos em *stock*, como restrições, a capacidade de armazenamento do produzido e a capacidade de produção das instalações.

1.2. OBJECTIVOS

O objectivo deste trabalho é otimizar o planeamento de produção tendo como meta a redução do custo total da energia eléctrica consumida.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

No capítulo 1 é feita uma introdução ao trabalho que foi desenvolvido, relevando os objectivos propostos. No capítulo seguinte, o 2º, é explicado o funcionamento da instalação de produção, apresentado o problema a resolver e quais as suas restrições. No 3º capítulo é feita a implementação do problema e são obtidos e analisados os resultados computacionais. No último capítulo, o 4º, são reunidas as principais conclusões e perspectivados futuros desenvolvimentos.

2. DESCRIÇÃO E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Neste capítulo é apresentado o “antes” e o “depois”, ou seja, é apresentado a forma como era feito o planeamento da produção, descriminando o funcionamento da fábrica e quais são os parâmetros necessários para o fazer. É feita uma análise dos erros cometidos no planeamento e qual a forma de os contornar.

É ainda exposta a proposta de resolução do problema, onde são exibidas as restrições do mesmo, os resultados e retiradas as devidas conclusões.

2.1. DESCRIÇÃO DO PROCESSO

Existem duas instalações para controlar, as quais são designadas por Instalação#1 e Instalação#2 (Figura 1).

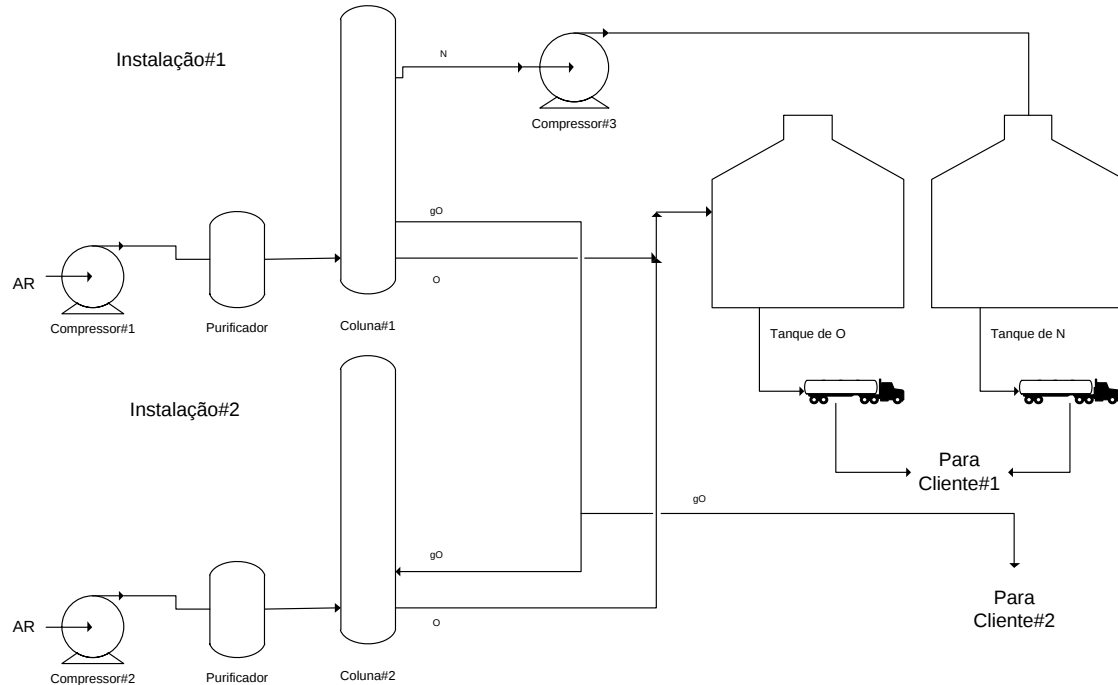


Figura 1 Esquemático das Instalações

Os produtos produzidos são O, gO e N.

A forma de funcionamento das Instalações é algo diferente, mas a concepção é a mesma. O ar entra pelos compressores 1 e 2 e passa por um Purificador que tem como função purificar o ar, ou seja, eliminar humidade e outros gases existentes na atmosfera. Seguidamente o ar purificado entra na Coluna e aqui o ar é separado através de processos de separação de ar, obtendo assim três produtos, O, N e gO. O primeiro é armazenado directamente no tanque enquanto que o segundo é enviado para um novo compressor (#3), onde é preparado para o seu armazenamento. Neste ponto reside a diferença entre as duas instalações, a Instalação#2 não é capaz de produzir o produto N.

As duas instalações são capazes de produzir gO que somente é requerido pelo Cliente#2. A procura de produto por parte deste cliente é sempre constante, sendo o produto retirado da produção de O, ou seja, durante o período de consumo do Cliente#2 a produção de O irá ser menor em ambas as instalações.

A principal premissa é que as fábricas não podem parar, têm de trabalhar 24h por dia sete dias por semana durante todo o ano. As perdas de produção devido a uma paragem são elevadas: três horas de produção O e gO e cinco horas de N. Isto deve-se ao tempo necessário para que as colunas entrem em funcionamento e a separação de ar seja correcta, respeitando assim os parâmetros de produção, ou seja, cumprindo com as purezas e impurezas mínimas e máximas permitidas pela lei para o produto em questão.

Para armazenar a produção, existem dois tanques, um para cada produto (produto gO não é armazenado), com igual capacidade, um milhão de m³. Estes têm níveis mínimos e máximos, que são de 15% (margem de segurança) e 92% respectivamente. Os limites são *standards* internacionais da empresa e a sua alteração é posta de parte perentoriamente.

Todas as semanas o Cliente#1 envia as previsões das quantidades que vai necessitar tanto de O como de N. O fornecimento de gO para o Cliente#2 é constante num total de 4000m³/h, desde que este esteja a trabalhar. Da Instalação#1 é enviado 3000m³/h e o restante, 1000m³/h, é enviado da Instalação#2. Estes valores são os limites físicos das colunas de cada instalação, sendo que o mínimo é igual para ambas, de 200m³/h.

As fábricas têm dois modos de funcionamento, Modo#1 e Modo#2. Se o Cliente#2 estiver a consumir as fábricas trabalham em Modo#2 (maior produção de gO e de N), quando o Cliente#2 pára, as fábricas passam a Modo#1 (maior produção de O, menor de N e nenhum de gO).

O Cliente#2 pára durante a semana 5h por dia, na altura em que a energia eléctrica é mais cara (horas de Ponta), mas durante o fim de semana não existe paragens, o consumo é constante durante as 48h.

O preço da energia é diferente durante o dia, tendo 3 fases: Vazio, Cheias e Pontas. Estas estão distribuídas como indica a Tabela 1.

Tabela 1 Horário Eléctrico

Sábado		horas	j				
Vazio	00h00 - 10h30	17	1				
	12h30 - 17h30						
	22h30 - 24h00						
Cheias	10h30 - 12h30	7	2				
	17h30 - 22h30						
Domingo							
Vazio	00h00 - 24h00	24	3				
De Segunda-Feira a Sexta-Feira							
Vazio	00h00 - 08h00	8	4	7	10	13	16
Cheias	08h00 - 17h00	11	5	8	11	14	17
	22h00 - 24h00						
Ponta	17h00 - 22h00	5	6	9	12	15	18
			2ª Feira	3ª Feira	4ª Feira	5ª Feira	6ª Feira

Esta tabela indica a correspondência entre as horas e dias das semanas com os respectivos fusos horários, ou períodos. Os períodos são representados pela letra *j*.

Na Figura 2 está representada a distribuição dos períodos do ciclo horário ao longo de uma semana.

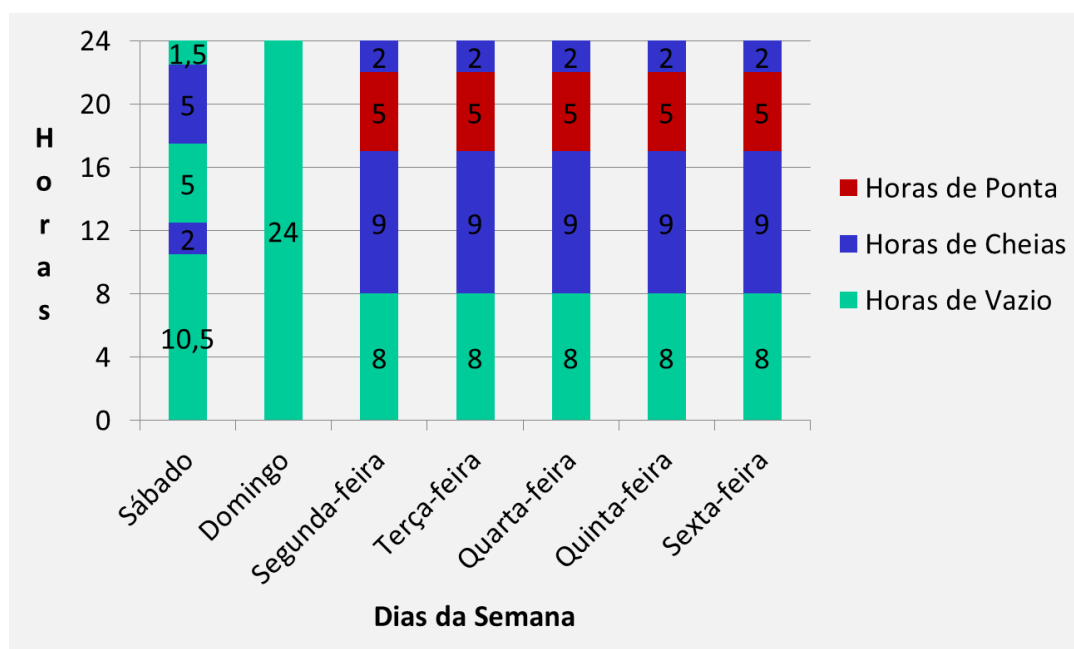


Figura 2 Distribuição do Ciclo horário ao longo da semana

A operação das instalações é feita actuando no controlador de potência dos compressores de ar de cada uma das unidades. Estes têm valores mínimos e máximos, sendo o mínimo de 1400kW e o máximo de 1700kW que corresponde a uma entrada de ar de entre 15000m³/h e 18000m³/h na Instalação#1 e na Instalação#2 entre 15000m³/h e 19000m³/h de caudal de ar que corresponde a uma potência mínima de 1400kW e máxima de 1800kW.

Esses caudais correspondem a 78% de N e 21% de O.

Em Modo#1 a Instalação#1 não é capaz de ultrapassar o caudal de 17000m³/h, o que nos limita a produção de O, mas permite, caso exista necessidade, aumentar a produção na Instalação#2. Normalmente isso não acontece, pois as instalações só passam para Modo#1 quando o Cliente#2 pára de consumir e essas horas coincidem com as horas de Ponta.

2.2. COMO ERA FEITO O PLANEAMENTO

O planeamento era feito de forma quase empírica, somente através da experiência o que levava a que existissem perdas de eficiência e custos de energia elevados. As mudanças no mundo empresarial são sempre complicadas, pois normalmente as pessoas são avessas a elas. No entanto, é necessário mudar para reduzir custos.

Com base nas previsões de saída de produtos por parte do Cliente#1 e nos consumos diários do Cliente#2 é feito um plano de produção para a semana em questão.

Parte-se do princípio que quanto menos operações de controlo existirem na instalação, mais estável esta se torna, causando uma menor carga de trabalho para o técnico de serviço. Sendo a distribuição das potências pelo fuso horário praticamente constante, não se aproveitava na totalidade as horas em que a energia eléctrica é mais barata.

Por exemplo, numa semana em que existe a necessidade de 700000m³ de O e 700000m³ de N e sabendo qual o requisito de produto por parte do cliente, assumimos ser necessário que, por dia, se produza 100000m³ de cada produto.

Nesse caso, é dividido a produção necessária por 24h e é atribuída uma potência (quase constante) para cada máquina durante o período em questão.

Não são feitos cálculos de modo a minimizar o consumo de energia, mas sim de forma a distribuir a produção por dia de trabalho, fazendo somente pequenos ajustes.

2.3. SOLUÇÃO PROPOSTA

Perante esta situação é proposta uma forma de reduzir os consumos de energia eléctrica, satisfazendo a procura dos clientes e as restrições do problema, fazendo a minimização dos custos energéticos.

Como o problema possuía restrições em número superior aos que o *Solver* consegue lidar, foi necessário escolher outro *software* que fosse capaz de lidar com tal problema.

A escolha recaiu no *Xpress*. [1]

Com o desenvolvimento do trabalho foi possível fazer uma simplificação do mesmo e a consequência dessa simplificação foi uma redução do número de restrições do problema. Mas, mesmo nesse momento manteve-se o *Xpress* como ferramenta de cálculo, pois já havia trabalho desenvolvido no mesmo, tanto ao nível de aprendizagem sobre a sua utilização como de restrições já elaboradas. No entanto, para o futuro prevê-se o desenvolvimento de uma aplicação utilizando a plataforma *Excel* e o respectivo *Solver* para facilitar a implementação deste novo processo de planeamento.

2.3.1. FUNÇÃO OBJECTIVO E RESTRIÇÕES DO PROBLEMA

Tal como já foi referido, o objectivo do problema é minimizar o custo total da energia eléctrica consumida, mas esse objectivo está limitado por um grupo de restrições.

Como as potências das máquinas estão directamente relacionados com os seus caudais de entrada de ar, nas expressões que definem o problema são usados apenas os caudais. A sensibilidade dos controladores não permite trabalhar com casas decimais, só com números inteiros. Neste problema, em que temos valores com ordens de grandeza relativamente elevados, não existe a necessidade, nem é viável, porque os compressores não aceitam valores de potências com casas decimais, só valores até as unidades. Por esse motivo é usada a programação inteira.

Para definir o problema, são criadas as seguintes variáveis:

Índices:

- i – índice do compressor ($i = 1, 2, 3$);
- j – índice do ciclo energético para todos os dias da semana - Vazio, Cheias e Pontas de Sábado a Sexta-Feira ($j = 1, 2, \dots, 18$);

Variáveis de Decisão:

$$X_{ij} = \text{Caudal de funcionamento do compressor } i \text{ no período } j. \quad (1)$$

$$PT_{Oj} = \text{Produto de O em Tanque no final do período } j. \quad (2)$$

$$PT_{Nj} = \text{Produto de N em Tanque no final do período } j. \quad (3)$$

Função Objectivo:

Minimizar o custo do consumo de energia eléctrica.

Restrições:

A primeira restrição do problema é a capacidade dos compressores. Na Tabela 2 apresenta-se, a capacidade máxima e mínima do Compressor#1. Por limitações físicas da instalação não é possível ultrapassar no modo de produção #1 aproximadamente o caudal de 17000m³/h. Tal não acontece no Compressor#2, que pode trabalhar nos limites de funcionamento em ambos os modos de produção.

Tabela 2 Quadro Relação potências/caudais

	Instalação#1 - Compressor#1					
	Potência kW	Caudal m3/h	Modo#1 m3/h		Modo#2 m3/h	
			O	N	O	N
Mín.	1.400	14.980	3.146	2.946	146	6.854
Máx. 1	1.590	17.013	3.372	2.627	572	6.427
Máx. 2	1.700	18.190	n/a	n/a	820	6.180

Como se verifica na Tabela 2 a potência do compressor está directamente relacionada com o caudal do mesmo, como tal, respeitando os limites de funcionamento, existem caudais máximos e mínimos de O e N para diferentes regimes de funcionamento.

A potência mínima de funcionamento do compressor, 1400kW, corresponde a um caudal de ar de aproximadamente 15000m³/h que por sua vez representa no Modo#1 (Cliente#2 não consome) a um caudal de O de 3146m³/h e de N de 2946m³/h. A produção de gO é de 200m³/h, que é o caudal mínimo para que ambas as instalações funcionem correctamente.

Ou seja, o caudal de O corresponde a 21% do caudal de ar de entrada no compressor menos 200m³/h de gO. No caso do funcionamento em Modo#2 o caudal de O corresponde à mesma percentagem do caudal de ar, mas é subtraído 3000m³/h, que corresponde ao caudal de gO que é enviado para o Cliente#2.

Para a produzir O é necessário a adição de N, essa adição reflete-se na produção final de N. A produção de N corresponde a 78% da entrada de ar no Compressor#1, mas como o Compressor#3 está limitado a 7000m³/h, temos sempre esse limite físico, pois o caudal mínimo do Compressor#1 é sempre suficiente para entregar os 7.000 m³/h ao Compressor#3.

Como tal, e tendo como exemplo o Modo#1 para uma potência do Compressor#1 igual a 1400kW, a produção de N é igual aos 7000m³/h menos a produção de O (valor de adição de N na Instalação#1 é sempre igual a produção de O), menos 1000m³/h (valor fixo de adição de N na Instalação#2 quando esta se encontra em Modo#1).

Na Tabela 2, a linha Máx. 1 representa o limite máximo que a Instalação#1 suporta para o Modo#1 de produção. Ou seja, neste modo de produção a instalação não tem capacidade de aumentar a sua produção de O, por esse motivo não é possível ultrapassar os 1.590 kW no Compressor#1. Tal não se sucede quando a instalação trabalha em Modo#2, podendo ir o compressor ao seu limite máximo de funcionamento, pois a produção de O é praticamente toda canalizada para gO.

Por exemplo, num período em que a instalação trabalhe em horas de vazio ($j=3$) e em Modo#2, temos para o Compressor#1 ($i=1$ e produto O) as seguintes restrições:

$$X_{13} \geq 146 \times 24 \quad (4)$$

$$X_{13} \leq 820 \times 24 \quad (5)$$

Mas no caso em que o mesmo compressor trabalha em Modo#1, ou seja, de Segunda a Sexta-Feira e durante as horas de ponta, temos para essas horas as seguintes restrições (a exemplo, Segunda-Feira):

$$X_{16} \geq 2946 \times 5 \quad (6)$$

$$X_{16} \leq 3373 \times 5 \quad (7)$$

Tal como referido, a Tabela 2 indica a produção máxima de N que podemos enviar para tanque nos dois modos de produção e para os caudais de entrada de ar no Compressor#1. Esse caudal pode ser reduzido até zero actuando no controlador de potência do compressor em questão.

Ambas as Instalações precisam de N para funcionar, embora a Instalação#2 só precise dessa adição de N quando funciona em Modo#1 e a Instalação#1 necessita de N em ambos os modos.

Os limites máximo e mínimo de funcionamento do Compressor#3 são, respectivamente $7000\text{m}^3/\text{h}$ e $3500\text{m}^3/\text{h}$, que por sua vez correspondem ao total de N produzido pelo mesmo compressor, mas não ao produto que vai para tanque e fica disponível para o Cliente#1. Pois, como referido, é necessário fazer adição às colunas para estas funcionarem. Por esse motivo a produção de N está directamente relacionada com os modos de produção das instalações.

O caudal de saída de N é obtido da mesma forma que nos restantes compressores, actuando no controlador de potência do mesmo. Estes valores variam entre os 4000kW e os 3300kW .

Por exemplo, num Domingo ($j=3$) em que todo o dia a instalação trabalha em horas de vazio e em Modo#2, temos para o Compressor#3 ($i=3$) as seguintes restrições:

$$X_{33} \geq (3500 - ((X_{13} \times 0,21) - 3000)) \times 24 \quad (8)$$

$$X_{33} \leq (7000 - ((X_{13} \times 0,21) - 3000)) \times 24 \quad (9)$$

Como se verifica na Expressão (9), as instalações laboram em Modo#2 e como tal a coluna da Instalação#2 não necessita de adição de N, enquanto que a coluna da Instalação#1 precisa de N na mesma proporção do gO que é enviado para o Cliente#2. Por esse motivo é decrementado à produção de N o gO, neste caso de valor de $3000\text{m}^3/\text{h}$.

No caso das instalações funcionarem em Modo#1 a situação é inversa, produzindo desse modo menos N, pois é necessário fazer adição a ambas as colunas. Nesse caso, ao contrário de decrementar o gO enviado para o Cliente#2, é incrementado $1000\text{m}^3/\text{h}$, ao que corresponde a toda a produção de gO da Instalação#1 que passa para O ($3000\text{m}^3/\text{h}$) e o mesmo se passa na Instalação#2, mas com valores de adição inferiores, no caso de $1000\text{m}^3/\text{h}$, o que perfaz um total de $4000\text{m}^3/\text{h}$.

Outra restrição do problema é a restrição Capacidade de Armazenamento. Como é natural, a capacidade de armazenamento das instalações é finito e consequentemente a produção tem de ser ajustada de acordo com as previsões de saída de produto por parte do Cliente#1.

Como existem dois produtos armazenáveis (O e N) existem dois tanques de igual capacidade para cada um deles. Consequentemente existem dois tipos de restrições, também para cada um dos produtos. Como tal e garantindo que no final de cada período (fuso horário) o tanque nunca fica cheio, garante-se assim que nunca vão existir problemas com a capacidade de armazenamento.

Ou seja, é necessário garantir no final do primeiro período desse mesmo dia ($j=1$) que a produção do Compressor#1 e do Compressor#2 mais a procura dos clientes durante esse período e o produto inicial do tanque de O esteja dentro dos parâmetros, mínimos e máximos. O mesmo acontece para os restantes períodos e para o Compressor#3, mas neste caso com um produto e tanque diferente.

A procura é um dado inicial do problema, visto que o Cliente#1 indica todas as semanas as suas necessidades de O e N.

O Produto Inicial em Tanque de O (PIT_O) é um dado inicial do problema, sendo usado nas expressões seguintes o Produto em Tanque de O (PT_O), que representa o produto que fica armazenado no final de cada período.

Também temos a restrição procura de produto por período, isto significa que a produção durante cada período mais o produto armazenado tem de satisfazer a procura dos Clientes.

Como tal, no primeiro período da semana ($j=1$) para o produto O a produção dos Compressores #1 e #2 mais o produto em tanque menos procura durante esse mesmo período (PP_O) é igual ao produto que fica no tanque no final desse mesmo período. Esse valor é usado para o período seguinte, ou seja, o valor inicial em tanque nos períodos subsequentes não será PIT_O, mas sim $PT_{O(j-1)}$.

No caso do período inicial o produto em tanque é o PIT_O, que é um dado inicial do problema.

$$PT_{O_1} = X_{11} + X_{21} + PIT_O - PP_{O_1} \quad (10)$$

Também é necessário verificar que o PT_O respeita sempre os limites de armazenamento, tanto máximo como mínimo.

$$PT_{O_1} \geq 150000 \quad (11)$$

$$PT_{O_1} \leq 920000 \quad (12)$$

Com estas restrições o problema fica definido e são respeitadas todas as exigências do mesmo. Garantindo assim que os clientes têm sempre produto, que a capacidade máxima e o limite mínimo dos tanques sejam respeitados e que as limitações dos compressores não sejam ultrapassadas, tendo sempre como objectivo minimizar o custo total da energia eléctrica consumida.

2.4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA

Variáveis de Decisão:

$$X_{ij} = \text{Caudal de funcionamento do compressor } i \text{ no período } j. \quad (13)$$

$$PT_{O_j} = \text{Produto de O em Tanque no final do período } j. \quad (14)$$

$$PT_{N_j} = \text{Produto de N em Tanque no final do período } j. \quad (15)$$

Função Objectivo:

$$\min = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{18} X_{i,j} \times C_{i,j} \quad (16)$$

Sujeito a:

$$L = \{1, 2, 3\} \quad (17)$$

$$M = \{1, 2, 3, 4, \dots, 18\} \quad (18)$$

$$N = \{2, 3\} \quad (19)$$

$$P = \{1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 16, 17\} \quad (20)$$

$$Q = \{5, 9, 12, 15, 18\} \quad (21)$$

$$X_{kj} \leq \text{Caudalmaxcompressor}_k \times hp_j, k \in N, l \in M \quad (22)$$

$$X_{kj} \geq \text{Caudalmincompressor}_k \times hp_j, k \in N, l \in M \quad (23)$$

$$X_{3l} \geq (3500 - ((X_{1l} \times 0,21) - 3000)) \times hp_l, l \in P \quad (24)$$

$$X_{3l} \leq (7000 - ((X_{1l} \times 0,21) - 3000)) \times hp_l, l \in P \quad (25)$$

$$X_{3h} \geq (3500 - ((X_{1h} \times 0,21) + 800)) \times 5, h \in Q \quad (26)$$

$$X_{3h} \leq (7000 - ((X_{1h} \times 0,21) + 800)) \times 5, h \in Q \quad (27)$$

$$PT_{O_1} = X_{11} + X_{21} + PIT_{O_1} - PP_{O_1} \quad (28)$$

$$PT_{O_j} = X_{1j} + X_{2j} + PT_{O_{j-1}} - PP_{O_j}, j \in M \quad (29)$$

$$PT_{O_j} \geq 150000, j \in M \quad (30)$$

$$PT_{O_j} \leq 920000, j \in M \quad (31)$$

$$PT_{N_1} = X_{31} + PIT_{N_1} - PP_{N_1} \quad (32)$$

$$PT_{N_j} = X_{3j} + PT_{N_{j-1}} - PP_{N_j}, j \in M \quad (33)$$

$$PT_{N_j} \geq 150000, j \in M \quad (34)$$

$$PT_{N_j} \leq 920000, j \in M \quad (35)$$

$$X_{ij}, PT_{O_j}, PT_{N_j} \geq 0 \text{ e inteiros}, i \in L, j \in M \quad (36)$$

Na função objectivo representada (16), o caudal do compressor, #1, #2 ou #3, é multiplicado por C_{ij} , em que C_{ij} representa o custo por m³/h da energia em cada um dos compressores i no período j .

As restrições (22) e (23) expressam as limitações físicas dos compressores #1 e #2. Esses são os caudais máximos e mínimos em cada um dos períodos e são multiplicados pelo número de horas desse mesmo período. O número de horas é representado por hp_i .

O mesmo acontece nas restrições (24), (25), (26) e (27), mas para o Compressor #3. Neste compressor as expressões nas horas de ponta, (26) e (27), são diferentes das restantes. Isto deve-se ao modo de funcionamento da instalação, em que o Compressor #3 tem de fornecer N em maior quantidade para ambas as instalações.

As restrições (28) e (29) dizem respeito ao nível do tanque de O em cada um dos períodos do semana. Estas expressões relacionam os caudais dos compressores #1 e #2, com o nível do tanque de O, PIT_{O_1} no primeiro caso e $PT_{O_{j-1}}$ nos restantes. É visto o período anterior, $j-1$, porque no período j em causa, é necessário saber qual era o nível do tanque no período imediatamente anterior. É deduzido ainda a procura do produto O no período j em questão, PP_{O_j} .

Nas expressões (32) e (33) acontece exactamente a mesma coisa que nas expressões (28) e (29), mas em causa está o tanque de N, o caudal do Compressor #3 e a procura de N, PP_{N_j} .

As fórmulas (30), (31), (34), (35) representam as restrições dos níveis máximos e mínimos dos tanques de O, para as duas primeiras expressões, e de N para as restantes.

3. IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS COMPUTACIONAIS

3.1. IMPLEMENTAÇÃO

Após serem definidas as restrições do problema e formuladas as equações que definem o mesmo, foi escrito o código utilizando o *Xpress* (Código completo no Anexo B).

Existem alguns dados, que são informações iniciais do problema, entre as quais se destaca a procura de produto por parte do Cliente. Essa procura é variável ao longo da semana, como é visível na Figura 3. Nessa mesma figura estão representados dois gráficos, a procura de O e de N. É representada a procura ao longo dos 18 períodos, que representam uma semana.

Essa mesma variação é dada a conhecer também à partida por parte do Cliente que indica as suas necessidades.

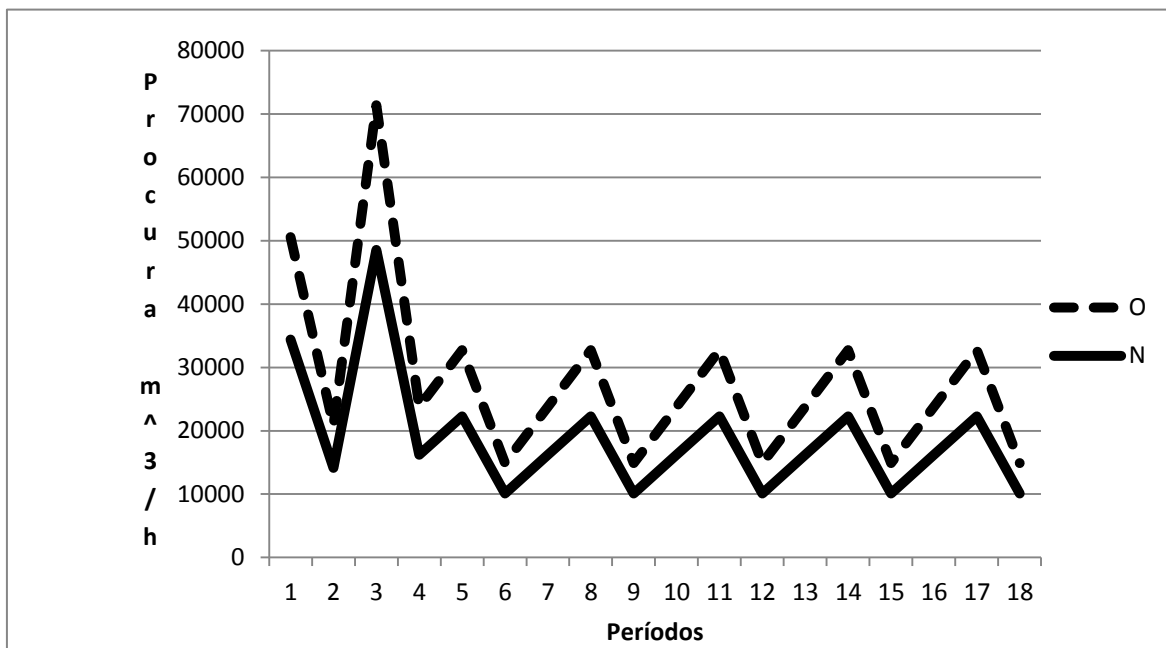


Figura 3 Procura de Produto por cada período

Outro dado inicial do problema é o nível dos tanques no arranque da semana, tanto do tanque de O como de N.

Para fácil introdução desses valores no *Xpress* foi criado um ficheiro auxiliar (“auxiliar.dat”), onde são inicializados os dados iniciais do problema. Esse ficheiro pode ser modificado no início de cada ciclo de acordo com as necessidades de produto.

Tal como indica o extrato de código abaixo são inicializadas algumas variáveis que correspondem aos dados iniciais do problema.

```
initializations from 'auxiliar.dat'
  PP_O PP_N PIT_O PIT_N CON
end-initializations
```

Que no caso são:

- PP_O – Procura no Período de O
- PP_N – Procura no Período de N
- PIT_O – Produto Inicial em Tanque de O
- PIT_N – Produto Inicial em Tanque de N
- CON – Custo Energético por cada período

Após a introdução dos valores iniciais do problema, existem condições para correr a aplicação, e essas são apresentadas na janela *Output/Input* como sendo a solução ideal para o problema em causa e para os dados inseridos, como é visível na Figura 4.

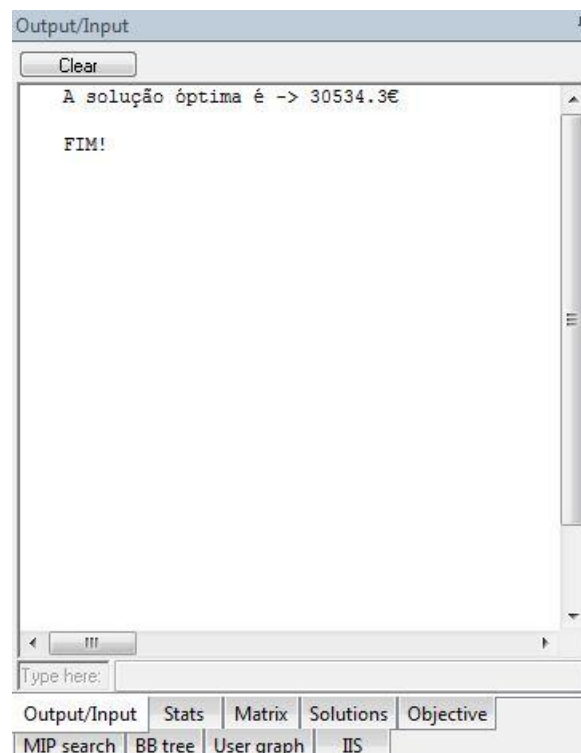


Figura 4 Saída de dados do Xpress

Como é possível ver na Figura 5 foram concluídos todos os cálculos e foi achada uma solução óptima, tal como indica a linha *Status: Solution is optimal*.

Stats			
Matrix:		Presolved:	
Rows(constraints):	288	Rows(constraints):	71
Columns(variables):	360	Columns(variables):	174
Nonzero elements:	790	Nonzero elements:	301
Global entities:	360	Global entities:	174
Sets:	0	Sets:	0
Set members:	0	Set members:	0
Overall status: Finished global search.			
LP relaxation:		Global search:	
Algorithm:	Simplex primal	Current node:	1
Simplex iterations:	39	Depth:	1
Objective:	166517	Active nodes:	0
Status:	Unfinished	Best bound:	166517
Time:	0.1s	Best solution:	166517
		Gap:	0%
		Status:	Solution is optimal.
		Time:	0.1s
Time overheads:			
Progress graphs:	0.1s		
Writing output:	0.0s		
Pausing:	0.0s		
Updating status:	0.1s		

Figura 5 Resumo dos cálculos e resultados do Xpress

A partir deste ponto é necessário verificar os valores devolvidos pelo Xpress e validar a sua viabilidade.

Como é possível visualizar na coluna *Solution* da Figura 6, o Xpress, apresenta a solução óptima que cumpre as restrições e minimiza os custos de energia eléctrica.

Matrix						
	Sketch	Column view	Row view	Graphical original	Graphical presolved	
	Column	Name	Rows	LB	UB	Solution
~	36	caudal(1,1)	3	2482	13940	13940
~	37	caudal(1,2)	3	1022	5740	5740
~	38	caudal(1,3)	3	3504	19680	19680
~	39	caudal(1,4)	4	1168	6560	6560
~	40	caudal(1,5)	4	1606	9020	9020
~	41	caudal(1,6)	4	14730	16865	14730
~	42	caudal(1,7)	4	1168	6560	6560
~	43	caudal(1,8)	4	1606	9020	9020
~	44	caudal(1,9)	4	14730	16865	14730
~	45	caudal(1,10)	4	1168	6560	6560
~	46	caudal(1,11)	4	1606	9020	9020
~	47	caudal(1,12)	4	14730	16865	14730
~	48	caudal(1,13)	4	1168	6560	6560
~	49	caudal(1,14)	4	1606	9020	9020
~	50	caudal(1,15)	4	14730	16865	14730
~	51	caudal(1,16)	4	1168	6560	6560
~	52	caudal(1,17)	4	1606	9020	9020
~	53	caudal(1,18)	4	14730	16865	14730

Figura 6 Caudais do Compressor#1 em todos os períodos

Após a leitura da Tabela 3, onde é possível visualizar quais os caudais limite do Compressor#1, tanto máximo como mínimo nas horas de Vazio e de Pontas e também o valor que é retornado como ótimo para a situação em questão. Como tal, podemos ver que o caudal do Compressor#1, nos períodos de Horas de Pontas é igual ao limite mínimo de caudal, enquanto que no período de Horas de Vazio o caudal é igual ao limite máximo do mesmo. Ou seja, quando a energia é mais barata produz-se o máximo possível e reduz-se o caudal para o mínimo quando o custo da energia é maior. Assim, produz-se o necessário de forma a cumprir com os requisitos de procura e com as restrições do problema.

Tabela 3 Resultado do Xpress com os caudais do Compressor#1

	Horas Vazio caudal (1,3)	Horas Ponta caudal (1,18)
Limite Mínimo	3.504	14.730
Limite Máximo	19.680	16.865
Valor de Saída	19.680	14.730

3.2. VALIDAÇÃO DO MODELO

Para validação do modelo foi executado uma série de testes, para uma semana e de seguida para quatro semanas.

Escolhendo aleatoriamente uma semana e três séries de quatro semanas cada, foram retirados os dados iniciais do problema e também as necessidades por parte dos clientes.

Com esses valores foram realizados o mesmo número de simulações recorrendo ao *Xpress*. Esses valores foram reunidos em diversas tabelas e comparados com os valores previamente existentes de planeamentos anteriores.

É ainda verificado para os mesmos valores recolhidos a influência que os níveis dos tanques têm sobre a solução final, ou seja, é exigido, que o nível do tanque, tanto de O como de N, no final de semana 1 para o primeiro caso no final da semana 4 para o

segundo, sejam iguais ao existente no início da semana seguinte, segunda ou quinta respectivamente.

Na Tabela 4 é possível visualizar, que estão dispostos os dados iniciais do problema, tanto a procura de O e N, como os níveis iniciais dos tanques e o custo associado aos resultados, tanto através do planeamento tradicional, como associados ao modelo matemático. Ou seja, esse é o custo de produção de O e N para essa semana, onde o “Manual” corresponde ao custo da energia previsto através do método tradicional e o “Xpress” ao custo da mesma energia, mas com a previsão feita com auxílio do modelo matemático. A coluna “Final” corresponde ao nível dos tanques no fim da semana.

É possível verificar que o ganho financeiro é bastante significativo, representa um ganho de 23%.

Tabela 4 Comparação de resultados para uma semana – Simulação 1

Procura	O - m3/h	600.000	Final
	N - m3/h	450.000	
Níveis	O - m3/h	550.000	521.540
	N - m3/h	450.000	306.157
Custo - €	Xpress	37.695	
	Manual	46.478	

A mesma simulação foi feita, mas desta vez foi exigido que os níveis dos tanques fossem iguais ou superiores aos níveis existentes na semana seguinte.

Para tal, apenas foi necessário alterar as linhas de código correspondentes aos níveis dos tanques no último período da semana.

```
PT_O(18) >= 500000
```

```
(...)
```

```
PT_N(18) >= 500000
```

Dessa forma, é garantido que é produzido o suficiente para manter os níveis e consequentemente garantir que existe produto suficiente para a semana seguinte.

Também é possível fazer esta alteração sem existir necessidade de mudar o código, apenas é necessário criar uma variável de entrada nova com o nível que é pretendido no final da semana e essa variável será lida do ficheiro auxiliar.dat.

Na Tabela 5 pode-se ler os mesmos valores iniciais que estão na Tabela 4, mas desta vez, exige-se que os níveis finais sejam iguais ou superiores aos descritos na coluna “Final”.

Tabela 5 Comparação de resultados para uma semana – Simulação 2

Procura	O - m3/h	600.000	Final
	N - m3/h	450.000	
Níveis	O - m3/h	550.000	500.000
	N - m3/h	450.000	500.000
Custo - €	<i>Xpress</i>	42.175	
	Manual	46.478	

Verifica-se que, mesmo assim, existe um ganho considerável, esse ganho representa 11%. Após a análise das duas últimas tabelas, verifica-se que o produto em *Stock* tem um peso significativo no resultado que se obtém com a utilização do *Xpress*, no caso, de aproximadamente 12%. Isto deve-se ao programa que no caso anterior usa o produto que existe em tanque, minimizando os custos energéticos da sua produção, mas dessa forma deixa de existir produto em tanque para a semana seguinte.

Da mesma forma foi elaborado um estudo, mas no caso, para quatro semanas consecutivas. Nos primeiros três casos não é tido em conta os níveis finais dos tanques, apenas é exigido que estes cumpram com as já conhecidas restrições do problema. Para tal, como podemos ver na Tabela 6, apenas é necessário, como dados iniciais do problema, a procura de produto e os níveis da primeira semana, não sendo necessário indicar os níveis intermédios, fica ao critério do programa apenas garantir que a procura é satisfeita. Do mesmo modo que nas tabelas anteriores, existem as linhas de “Custo”, para comparar os novos valores com os previamente existentes. E a coluna “Final” que indica os níveis dos tanques no final das quatro semanas.

Tabela 6 Comparação de resultados para quatro semanas – Simulação 1

	Inicial	Semana #1	Semana #2	Semana #3	Semana #4	
Procura	O - m3/h	500.000	600.000	550.000	450.000	
	N - m3/h	500.000	650.000	500.000	450.000	Final
Níveis	O - m3/h	400.000				498.814
	N - m3/h	400.000				151.337
Custo - €	Xpress	165.534				
	Manual	201.280				

Tal como no caso anterior, quando não é tido em conta os níveis finais dos tanques, o ganho financeiro ronda os 22%.

Como referido, foram elaboradas mais duas simulações para validação do modelo e obtenção de resultados computacionais que servissem de comparação com os valores previamente obtidos, pode-se visualizar os seus dados nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 Comparação de resultados para quatro semanas – Simulação 2

	Inicial	Semana #1	Semana #2	Semana #3	Semana #4	
Procura	O - m3/h	700.000	650.000	750.000	550.000	
	N - m3/h	550.000	650.000	600.000	700.000	Final
Níveis	O - m3/h	500.000				202.738
	N - m3/h	550.000				150.000
Custo - €	Xpress	172.759				
	Manual	238.464				

Tabela 8 Comparação de resultados para quatro semanas – Simulação 3

	Inicial	Semana #1	Semana #2	Semana #3	Semana #4	
Procura	O - m3/h	850.000	750.000	700.000	700.000	
	N - m3/h	500.000	450.000	550.000	450.000	Final
Níveis	O - m3/h	550.000				158.627
	N - m3/h	400.000				151.337
Custo - €	Xpress	166.516				
	Manual	203.310				

A comparação destes valores permite destacar logo que existe um ganho real em termos financeiros. Especialmente no caso da Tabela 7, em que o ganho é de 39% e no caso seguinte este ganho situa-se apenas nos 22%, valor que está próximos dos resultados anteriormente obtidos. A conclusão evidente destes valores é que, com o aumento significativo da procura de N, o *Xpress* conseguiu, neste caso, obter resultados muito positivos.

De notar que o produto em tanque no final das quatro semanas está muito próximo, ou mesmo, no limite mínimo do mesmo, não existindo, desta forma produto suficiente para as semanas subsequentes.

Por esse motivo, foi executado para os mesmos valores nas três últimas tabelas, três novas simulações, mas garantindo que no final das quatro semanas o produto em tanque é igual ou superior ao produto existente no início da semana número 5.

As próximas Tabelas, 9, 10 e 11, são em tudo idênticas às anteriores, mas nestes casos, a coluna “Final” representa um dado inicial do problema, que se pretende respeitar e não um valor final atribuído pelo *Xpress*.

Para o caso da Tabela 9 foi necessário alterar as linhas de código correspondentes aos níveis dos tanques no último período da quarta semana ($j=72$).

```
PT_O(72) >= 500000
```

```
(...)
```

```
PT_N(72) >= 500000
```

Tabela 9 Comparação de resultados para quatro semanas – Simulação 4

	Inicial	Semana #1	Semana #2	Semana #3	Semana #4	
Procura	O - m3/h	500.000	600.000	550.000	450.000	
	N - m3/h	500.000	650.000	500.000	450.000	Final
Níveis	O - m3/h	400.000				500.000
	N - m3/h	400.000				500.000
Custo - €	Xpress	174.240				
	Manual	201.280				

Para a Tabela 10 foram alteradas as mesmas linhas de código, mas com valores diferentes, que correspondem aos níveis dos tanques no último período da quarta semana.

```
PT_O(72) >= 450000
```

```
(...)
```

```
PT_N(72) >= 450000
```

Tabela 10 Comparação de resultados para quatro semanas – Simulação 5

	Inicial	Semana #1	Semana #2	Semana #3	Semana #4	
Procura	O - m3/h	700.000	650.000	750.000	550.000	
	N - m3/h	550.000	650.000	600.000	700.000	Final
Níveis	O - m3/h	500.000				450.000
	N - m3/h	550.000				450.000
Custo - €	Xpress	184.965				
	Manual	238.464				

E para a Tabela 11 verifica-se a mesma situação, sendo alterado as linhas de código correspondentes aos níveis dos tanques no último período da quarta semana.

```
PT_O (72) >=450000
```

```
(...)
```

```
PT_N (72) >=350000
```

Tabela 11 Comparação de resultados para quatro semanas – Simulação 6

	Inicial	Semana #1	Semana #2	Semana #3	Semana #4	
Procura	O - m3/h	850.000	750.000	700.000	700.000	
	N - m3/h	500.000	450.000	550.000	450.000	Final
Níveis	O - m3/h	550.000				450.000
	N - m3/h	400.000				350.000
Custo - €	Xpress	186.074				
	Manual	203.310				

É possível verificar que tentando respeitar os níveis finais dos tanques, os custos de produção sobem consideravelmente. Mesmo assim, tal como se verifica na Tabela 12, mantêm-se níveis de melhoramento bastante assináveis, no caso de 16%, 29% e 10% respectivamente. Verifica-se também após este estudo que os ganhos financeiros se situam numa média mensal de €32600.

Tabela 12 – Resumo das simulações efectuadas

		Simulação #4	Simulação #5	Simulação #6
Custo - €	Modelo Matemático	174.240	184.965	186.074
	Planeamento Tradicional	201.280	238.464	203.310
Ganho - %		16%	29%	9%
Máximo - €		53.499		
Mínimo - €		17.236		
Média - €		32.592		

Não existe portanto grande diferença quando se faz uma simulação para uma semana ou para diversas semanas. A mesma justificação, cobre ambos os testes, as diferenças de valores quando se impõe um limite mínimo para o nível do tanque tem um peso significativo na solução apresentada, esse peso corresponde a aproximadamente 8%.

Além disto, existem outras melhorias muito significativas, tanto ao nível dos recursos humanos como de tempo e horas de serviço, que deixam de ser necessárias para a elaboração do plano de produção. Esse mesmo plano demora entre quatro a seis horas para ser elaborado, o que, para além de termos a confiança que a solução encontrada é a solução óptima, existe uma vantagem real em termos de tempo de serviço despendido. Desta forma, os mesmos recursos podem ser aplicados mais activamente noutras actividades da empresa com maior valor acrescentado.

4. CONCLUSÕES

Nos dias de hoje as empresas e organizações são confrontadas com alterações vertiginosas nos seus modos de funcionamento. Tudo muda, desde a gestão dos clientes aos valores. Esta mudança foi sentida também com a liberalização do mercado eléctrico, o que fez com que tenhamos sido confrontados com a necessidade de implementar mudanças profundas de funcionamento. Essas mudanças sentem-se no modo de operação da empresa, onde antes apenas se pagava o que se consumia.

Agora a energia eléctrica é comprada com antecedência e por previsões de consumo. Isto significa que tem de existir um planeamento rigoroso do consumo que se pretende efectuar para não haver o risco de penalizações por consumo excedente nem por perdas por consumo não efectuado de energia eléctrica comprada.

Como tal, o objectivo deste trabalho centrou-se em otimizar o planeamento de produção tendo como meta a redução do custo total da energia eléctrica consumida.

Para isso foi elaborado um levantamento de todas as variáveis do problema e consequentemente foi escrito um grupo de restrições que definem o trabalho, tendo em contas as limitações das máquinas, dos tanques e as necessidades de produtos por parte dos Clientes. Recorrendo a métodos de investigação operacional, no caso a programação inteira, foi desenvolvido o modelo de optimização para atingir o objectivo do trabalho.

Para resolução do problema foi necessária a escolha de um *software*. A primeira opção foi o *Solver*, por fazer parte de uma ferramenta amplamente familiarizada por todos e também de fácil acesso, que é o *Excel*. Com o desenvolvimento do trabalho foram encontradas algumas barreiras que se prendiam com o elevado número de restrições, o que impossibilitou o uso do *Solver*. A solução encontrada foi partir para outro *software*, no caso o *Xpress*, ferramenta bastante poderosa na área de optimização e com uma versão que a permite usar gratuitamente.

O uso de uma ferramenta de optimização traz mais-valias evidentes, onde os resultados obtidos comparativamente ao que era feito antes, representam um ganho significativo. Verifica-se de igual forma que o produto em *Stock* tem um peso significativo na solução óptima encontrada pelo *Xpress*.

Outra vantagem de extrema importância, consiste na redução de tempo despendido pelos recursos humanos da empresa. Com esta redução, deixa de existir a necessidade de estudo e de perda de tempo para a elaboração do plano de produção e passa a existir mais tempo para outras actividades que possam trazer maiores benefícios para a empresa.

Uma boa continuação deste trabalho será o desenvolvimento de uma aplicação com um interface mais *user-friendly*, que permita ser usada por qualquer utilizador sem conhecimentos de programação e de optimização. Também será um bom investimento fazer um planeamento mais alargado, com previsões/estimativas para as próximas semanas, tendo em conta o historial de semanas anteriores e a tendência de mercado dessas mesmas semanas.

Referências Documentais

- [1] DASH OPTIMIZATION — Xpress-Mosel User Guide, Release 1.4, 2004
- [2] FREIRE, Carlos Miguel Monteiro — Um Estudo de Caso – A Liberalização do Sector Eléctrico e os processos de Mudança Organizacional no Monopólio da Distribuição de Energia Eléctrica em Portugal. Instituto Superior de Economia e Gestão da Universidade Técnica de Lisboa, na especialidade de Sociologia Económica e das Organizações em 2004.
- [3] GONÇALVES, Ana Maria — Espanhóis criam Fortia para rivalizar com a EDP no mercado português, http://economico.sapo.pt/noticias/espanhois-criam-fortia-para-rivalizar-com-edp-no-mercado-portugues_85952.html, 2010.
- [4] JORNAL DE NEGOCIOS — Fortia Energia chega a Portugal para competir na electricidade, http://www.jornaldenegocios.pt/home.php?template=SHOWNEWS_V2&id=418579, 2010.

Anexo A. Quadro da relação entre potências e caudais

Neste anexo é apresentado a relação entre a potência e os caudais dos compressores para cada uma das instalações.

Instalação#1 - Compressor#1								Instalação#2 - Compressor#2					Compressor#3	
		TOTAIS		Modo#2 - GÁS		Modo#1 - LIQ				TOTAIS	Modo#2	Modo#1	POT KW	m3/h
POT KW	Caudal	O	N	O	N	O	N	POT KW	Caudal	O	O	O		
1.400	14.980	3.146	7.000	146	6.854	2.946	3.054	1.400	14.980	3.146	2.146	2.946	3.300	-3.500
1.410	15.087	3.168	7.000	168	6.832	2.968	3.032	1.410	15.087	3.168	2.168	2.968	3.320	-3.400
1.420	15.194	3.191	7.000	191	6.809	2.991	3.009	1.420	15.194	3.191	2.191	2.991	3.340	-3.300
1.430	15.301	3.213	7.000	213	6.787	3.013	2.987	1.430	15.301	3.213	2.213	3.013	3.360	-3.200
1.440	15.408	3.236	7.000	236	6.764	3.036	2.964	1.440	15.408	3.236	2.236	3.036	3.380	-3.100
1.450	15.515	3.258	7.000	258	6.742	3.058	2.942	1.450	15.515	3.258	2.258	3.058	3.400	-3.000
1.460	15.622	3.281	7.000	281	6.719	3.081	2.919	1.460	15.622	3.281	2.281	3.081	3.420	-2.900
1.470	15.729	3.303	7.000	303	6.697	3.103	2.897	1.470	15.729	3.303	2.303	3.103	3.440	-2.800
1.480	15.836	3.326	7.000	326	6.674	3.126	2.874	1.480	15.836	3.326	2.326	3.126	3.460	-2.700
1.490	15.943	3.348	7.000	348	6.652	3.148	2.852	1.490	15.943	3.348	2.348	3.148	3.480	-2.600
1.500	16.050	3.371	7.000	371	6.630	3.171	2.830	1.500	16.050	3.371	2.371	3.171	3.500	-2.500
1.510	16.157	3.393	7.000	393	6.607	3.193	2.807	1.510	16.157	3.393	2.393	3.193	3.520	-2.400
1.520	16.264	3.415	7.000	415	6.585	3.215	2.785	1.520	16.264	3.415	2.415	3.215	3.540	-2.300
1.530	16.371	3.438	7.000	438	6.562	3.238	2.762	1.530	16.371	3.438	2.438	3.238	3.560	-2.200
1.540	16.478	3.460	7.000	460	6.540	3.260	2.740	1.540	16.478	3.460	2.460	3.260	3.580	-2.100
1.550	16.585	3.483	7.000	483	6.517	3.283	2.717	1.550	16.585	3.483	2.483	3.283	3.600	-2.000
1.560	16.692	3.505	7.000	505	6.495	3.305	2.695	1.560	16.692	3.505	2.505	3.305	3.620	-1.900
1.570	16.799	3.528	7.000	528	6.472	3.328	2.672	1.570	16.799	3.528	2.528	3.328	3.640	-1.800
1.580	16.906	3.550	7.000	550	6.450	3.350	2.650	1.580	16.906	3.550	2.550	3.350	3.660	-1.700
1.590	17.013	3.573	7.000	573	6.427	3.373	2.627	1.590	17.013	3.573	2.573	3.373	3.680	-1.600
1.600	17.120	3.595	7.000	595	6.405	Em modo líquido não é possível, devido a restrições físicas da instalação, ultrapassar os 17.000 m3/h na entrada do compressor		1.600	17.120	3.595	2.595	3.395	3.700	-1.500
1.610	17.227	3.618	7.000	618	6.382			1.610	17.227	3.618	2.618	3.418	3.720	-1.400
1.620	17.334	3.640	7.000	640	6.360			1.620	17.334	3.640	2.640	3.440	3.740	-1.300
1.630	17.441	3.663	7.000	663	6.337			1.630	17.441	3.663	2.663	3.463	3.760	-1.200
1.640	17.548	3.685	7.000	685	6.315			1.640	17.548	3.685	2.685	3.485	3.780	-1.100
1.650	17.655	3.708	7.000	708	6.292			1.650	17.655	3.708	2.708	3.508	3.800	-1.000
1.660	17.762	3.730	7.000	730	6.270			1.660	17.762	3.730	2.730	3.530	3.820	-900
1.670	17.869	3.752	7.000	752	6.248			1.670	17.869	3.752	2.752	3.552	3.840	-800
1.680	17.976	3.775	7.000	775	6.225			1.680	17.976	3.775	2.775	3.575	3.860	-700
1.690	18.083	3.797	7.000	797	6.203			1.690	18.083	3.797	2.797	3.597	3.880	-600
1.700	18.190	3.820	7.000	820	6.180			1.700	18.190	3.820	2.820	3.620	3.900	-500
								1.710	18.297	3.842	2.842	3.642	3.920	-400
								1.720	18.404	3.865	2.865	3.665	3.940	-300
								1.730	18.511	3.887	2.887	3.687	3.960	-200
								1.740	18.618	3.910	2.910	3.710	3.980	-100
								1.750	18.725	3.932	2.932	3.732	4.000	0
								1.760	18.832	3.955	2.955	3.755		
								1.770	18.939	3.977	2.977	3.777		
								1.780	19.046	4.000	3.000	3.800		
								1.790	19.153	4.022	3.022	3.822		
								1.800	19.260	4.045	3.045	3.845		

Anexo B. Código escrito no *XPress*

```
model ModelName
  uses "mmxprs"; !gain access to the Xpress-
Optimizer solver

  declarations
    ! Xij -> Caudal de funcionamento do
compressor i, no periodo j

    COMP = 1..3                                !
Identifica os Compressores -> i
    PER = 1..18                                !
Identifica o fuso Horário -> j

    PP_O: array(PER) of integer                !
Procura por periodo de O
    PP_N: array(PER) of integer                !
Procura por periodo de N
    PIT_O,PIT_N: integer                      !
Produto inicial em TQ
    CON: array(COMP, PER) of real              ! custo
de cada m3/h de O e N em cada periodo

    PT_O: array(PER) of mpvar                 !
Produto O em TQ no periodo PER
    PT_N: array(PER) of mpvar                 !
Produto N em TQ no periodo PER
    caudal: array(COMP, PER) of mpvar         !
Caudal do compressor i no periodo j

  end-declarations

  initializations from 'auxiliar.dat'
    PP_O PP_N PIT_O PIT_N CON
  end-initializations

  ! restrições para os caudais max e min do
compressores

    caudal(1,1) >= 146*17
    caudal(1,1) <= 820*17
    caudal(2,1) >= 2146*17
    caudal(2,1) <= 3045*17

    (caudal(3,1)/17)+(0.21*caudal(1,1)) <=
10000
```

```

(caudal(3,1)/17)+(0.21*caudal(1,1)) >= 6500

        caudal(1,2) >= 146*7
        caudal(1,2) <= 820*7
        caudal(2,2) >= 2146*7
        caudal(2,2) <= 3045*7

(caudal(3,2)/7)+(0.21*caudal(1,2)) <= 10000

(caudal(3,2)/7)+(0.21*caudal(1,2)) >= 6500

        caudal(1,3) >= 146*24
        caudal(1,3) <= 820*24
        caudal(2,3) >= 2146*24
        caudal(2,3) <= 3045*24

        (caudal(3,3)/24)+(0.21*caudal(1,3)) <=
10000

        (caudal(3,3)/24)+(0.21*caudal(1,3)) >= 6500

        caudal(1,4) >= 146*8
        caudal(1,4) <= 820*8
        caudal(2,4) >= 2146*8
        caudal(2,4) <= 3045*8

(caudal(3,4)/8)+(0.21*caudal(1,4)) <= 10000

(caudal(3,4)/8)+(0.21*caudal(1,4)) >= 6500

        caudal(1,5) >= 146*11
        caudal(1,5) <= 820*11
        caudal(2,5) >= 2146*11
        caudal(2,5) <= 3045*11

        (caudal(3,5)/11)+(0.21*caudal(1,5)) <=
10000

        (caudal(3,5)/11)+(0.21*caudal(1,5)) >= 6500

        caudal(1,6) >= 2946*5
        caudal(1,6) <= 3373*5
        caudal(2,6) >= 2946*5
        caudal(2,6) <= 3845*5

(caudal(3,6)/5)+(0.21*caudal(1,6)) <= 6000

(caudal(3,6)/5)+(0.21*caudal(1,6)) >= 2500

        caudal(1,7) >= 146*8

```

```

caudal(1,7) <= 820*8
caudal(2,7) >= 2146*8
caudal(2,7) <= 3045*8

(caudal(3,7)/8)+(0.21*caudal(1,7)) <= 10000

(caudal(3,7)/8)+(0.21*caudal(1,7)) >= 6500

caudal(1,8) >= 146*11
caudal(1,8) <= 820*11
caudal(2,8) >= 2146*11
caudal(2,8) <= 3045*11

(caudal(3,8)/11)+(0.21*caudal(1,8)) <=
10000

(caudal(3,8)/11)+(0.21*caudal(1,8)) >= 6500

caudal(1,9) >= 2946*5
caudal(1,9) <= 3373*5
caudal(2,9) >= 2946*5
caudal(2,9) <= 3845*5

(caudal(3,9)/5)+(0.21*caudal(1,9)) <= 6000

(caudal(3,9)/5)+(0.21*caudal(1,9)) >= 2500

caudal(1,10) >= 146*8
caudal(1,10) <= 820*8
caudal(2,10) >= 2146*8
caudal(2,10) <= 3045*8

(caudal(3,10)/8)+(0.21*caudal(1,10)) <=
10000

(caudal(3,10)/8)+(0.21*caudal(1,10)) >=
6500

caudal(1,11) >= 146*11
caudal(1,11) <= 820*11
caudal(2,11) >= 2146*11
caudal(2,11) <= 3045*11

(caudal(3,11)/11)+(0.21*caudal(1,11)) <=
10000

(caudal(3,11)/11)+(0.21*caudal(1,11)) >=
6500

caudal(1,12) >= 2946*5
caudal(1,12) <= 3373*5

```

```

caudal (2,12) >= 2946*5
caudal (2,12) <= 3845*5

(caudal (3,12) /5)+(0.21*caudal (1,12)) <=
6000

(caudal (3,12) /5)+(0.21*caudal (1,12)) >=
2500

caudal (1,13) >= 146*8
caudal (1,13) <= 820*8
caudal (2,13) >= 2146*8
caudal (2,13) <= 3045*8

(caudal (3,13) /8)+(0.21*caudal (1,13)) <=
10000

(caudal (3,13) /8)+(0.21*caudal (1,13)) >=
6500

caudal (1,14) >= 146*11
caudal (1,14) <= 820*11
caudal (2,14) >= 2146*11
caudal (2,14) <= 3045*11

(caudal (3,14) /11)+(0.21*caudal (1,14)) <=
10000

(caudal (3,14) /11)+(0.21*caudal (1,14)) >=
6500

caudal (1,15) >= 2946*5
caudal (1,15) <= 3373*5
caudal (2,15) >= 2946*5
caudal (2,15) <= 3845*5

(caudal (3,15) /5)+(0.21*caudal (1,15)) <=
6000

(caudal (3,15) /5)+(0.21*caudal (1,15)) >=
2500

caudal (1,16) >= 146*8
caudal (1,16) <= 820*8
caudal (2,16) >= 2146*8
caudal (2,16) <= 3045*8

(caudal (3,16) /8)+(0.21*caudal (1,16)) <=
10000

```

```

(caudal(3,16)/8)+(0.21*caudal(1,16)) >=
6500

        caudal(1,17) >= 146*11
        caudal(1,17) <= 820*11
        caudal(2,17) >= 2146*11
        caudal(2,17) <= 3045*11

(caudal(3,17)/11)+(0.21*caudal(1,17)) <=
10000

(caudal(3,17)/11)+(0.21*caudal(1,17)) >=
6500

        caudal(1,18) >= 2946*5
        caudal(1,18) <= 3373*5
        caudal(2,18) >= 2946*5
        caudal(2,18) <= 3845*5

(caudal(3,18)/5)+(0.21*caudal(1,18)) <=
6000

(caudal(3,18)/5)+(0.21*caudal(1,18)) >=
2500

!produto em tanque no final de cada periodo
!restrições de capacidade de armazenamento
e de satisfação das necessidades dos clientes

PT_O(1)=
(caudal(1,1)+caudal(2,1))+PIT_O-PP_O(1)
PT_O(1)>=150000
PT_O(1)<=920000
PT_O(2)=
(caudal(1,2)+caudal(2,2))+PT_O(1)-PP_O(2)
PT_O(2)>=150000
PT_O(2)<=920000
PT_O(3)=
(caudal(1,3)+caudal(2,3))+PT_O(2)-PP_O(3)
PT_O(3)>=150000
PT_O(3)<=920000
PT_O(4)=
(caudal(1,4)+caudal(2,4))+PT_O(3)-PP_O(4)
PT_O(4)>=150000
PT_O(4)<=920000
PT_O(5)=
(caudal(1,5)+caudal(2,5))+PT_O(4)-PP_O(5)
PT_O(5)>=150000
PT_O(5)<=920000

```

```

PT_O(6)=
(caudal(1,6)+caudal(2,6))+PT_O(5)-PP_O(6)
PT_O(6)>=150000
PT_O(6)<=920000
PT_O(7)=
(caudal(1,7)+caudal(2,7))+PT_O(6)-PP_O(7)
PT_O(7)>=150000
PT_O(7)<=920000
PT_O(8)=
(caudal(1,8)+caudal(2,8))+PT_O(7)-PP_O(8)
PT_O(8)>=150000
PT_O(8)<=920000
PT_O(9)=
(caudal(1,9)+caudal(2,9))+PT_O(8)-PP_O(9)
PT_O(9)>=150000
PT_O(9)<=920000
PT_O(10)=
(caudal(1,10)+caudal(2,10))+PT_O(9)-PP_O(10)
PT_O(10)>=150000
PT_O(10)<=920000
PT_O(11)=
(caudal(1,11)+caudal(2,11))+PT_O(10)-PP_O(11)
PT_O(11)>=150000
PT_O(11)<=920000
PT_O(12)=
(caudal(1,12)+caudal(2,12))+PT_O(11)-PP_O(12)
PT_O(12)>=150000
PT_O(12)<=920000
PT_O(13)=
(caudal(1,13)+caudal(2,13))+PT_O(12)-PP_O(13)
PT_O(13)>=150000
PT_O(13)<=920000
PT_O(14)=
(caudal(1,14)+caudal(2,14))+PT_O(13)-PP_O(14)
PT_O(14)>=150000
PT_O(14)<=920000
PT_O(15)=
(caudal(1,15)+caudal(2,15))+PT_O(14)-PP_O(15)
PT_O(15)>=150000
PT_O(15)<=920000
PT_O(16)=
(caudal(1,16)+caudal(2,16))+PT_O(15)-PP_O(16)
PT_O(16)>=150000
PT_O(16)<=920000
PT_O(17)=
(caudal(1,17)+caudal(2,17))+PT_O(16)-PP_O(17)
PT_O(17)>=150000
PT_O(17)<=920000
PT_O(18)=
(caudal(1,18)+caudal(2,18))+PT_O(17)-PP_O(18)
PT_O(18)>=150000

```

```

PT_O(18)<=920000

PT_N(1)= caudal(3,1)+PIT_N-PP_N(1)
PT_N(1)>=150000
PT_N(1)<=920000
PT_N(2)= caudal(3,2)+PT_N(1)-PP_N(2)
PT_N(2)>=150000
PT_N(2)<=920000
PT_N(3)= caudal(3,3)+PT_N(2)-PP_N(3)
PT_N(3)>=150000
PT_N(3)<=920000
PT_N(4)= caudal(1,4)+PT_N(3)-PP_N(4)
PT_N(4)>=150000
PT_N(4)<=920000
PT_N(5)= caudal(1,5)+PT_N(4)-PP_N(5)
PT_N(5)>=150000
PT_N(5)<=920000
PT_N(6)= caudal(1,6)+PT_N(5)-PP_N(6)
PT_N(6)>=150000
PT_N(6)<=920000
PT_N(7)= caudal(1,7)+PT_N(6)-PP_N(7)
PT_N(7)>=150000
PT_N(7)<=920000
PT_N(8)= caudal(1,8)+PT_N(7)-PP_N(8)
PT_N(8)>=150000
PT_N(8)<=920000
PT_N(9)= caudal(1,9)+PT_N(8)-PP_N(9)
PT_N(9)>=150000
PT_N(9)<=920000
PT_N(10)= caudal(1,10)+PT_N(9)-
PP_N(10)
PT_N(10)>=150000
PT_N(10)<=920000
PT_N(11)= caudal(1,11)+PT_N(10)-
PP_N(11)
PT_N(11)>=150000
PT_N(11)<=920000
PT_N(12)= caudal(1,12)+PT_N(11)-
PP_N(12)
PT_N(12)>=150000
PT_N(12)<=920000
PT_N(13)= caudal(1,13)+PT_N(12)-
PP_N(13)
PT_N(13)>=150000
PT_N(13)<=920000
PT_N(14)= caudal(1,14)+PT_N(13)-
PP_N(14)
PT_N(14)>=150000
PT_N(14)<=920000
PT_N(15)= caudal(1,15)+PT_N(14)-
PP_N(15)

```

```

        PT_N(15) >= 150000
        PT_N(15) <= 920000
        PT_N(16) = caudal(1,16) + PT_N(15) -
PP_N(16)
        PT_N(16) >= 150000
        PT_N(16) <= 920000
        PT_N(17) = caudal(1,17) + PT_N(16) -
PP_N(17)
        PT_N(17) >= 150000
        PT_N(17) <= 920000
        PT_N(18) = caudal(1,18) + PT_N(17) -
PP_N(18)
        PT_N(18) >= 150000
        PT_N(18) <= 920000

        forall(j in PER) do
        PT_O(j) is_integer
        PT_N(j) is_integer
        end-do
        forall(i in COMP) do
        forall(j in PER) caudal(i,j)
is_integer
        end-do

        !função objetivo
        TotalCusto := sum(i in COMP) (sum(j in PER)
(CON(i,j)*caudal(i,j)))
        minimize(TotalCusto)

        writeln("A solução óptima é -> ",
getobjval,"€")
        writeln("\nFIM!")

        end-model

```

Anexo C. Exemplo do ficheiro “auxiliar.dat”

```
auxiliar.dat - Bloco de notas
Ficheiro  Editar  Formatar  Ver  Ajuda
! Data file for `tese3.mos'

PIT_O: 550000
PIT_N: 450000

PP_O: [60714    25000    85714    28571    39286    17857    28571    39286    17857    28571    39286    17857    28571    39286    17857    28571    39286    17857
]
PP_N: [45536    18750    64286    21429    29464    13393    21429    29464    13393    21429    29464    13393    21429    29464    13393    21429    29464    13393
]
HORAS: [17      7       24      8       11      5       8       11      5       8       11      5       8       11      5       8       11      5
]
CON: [0.013356  0.040067    0.013356    0.013356    0.040067    0.008051    0.013356    0.040067    0.008051    0.013356
0.004455      0.013364    0.004455    0.004455    0.013364    0.008051    0.004455    0.013364    0.008051    0.004455
0.026000      0.078000    0.026000    0.026000    0.078000    0.234000    0.026000    0.078000    0.234000    0.026000
]
```