

Modelação de transitórios lentos em redes de gás

André Ramos Pereira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. João Carlos de Campos Henriques
Prof. Luís Manuel de Carvalho Gato

Júri

Presidente: Prof. Carlos Frederico Neves Bettencourt da Silva
Orientador: Prof. Luís Manuel de Carvalho Gato
Vogais: Eng. António Manuel Gomes Domingues
Prof. Luís Rego da Cunha de Eça

Novembro 2018

Resumo

Quando se é responsável pela gestão ou concepção de um projecto, que envolva valores elevados, é necessário simular computacionalmente a estrutura e modo de funcionamento da mesma, possibilitando a correcção de erros hipotéticos e uma previsão do comportamento do sistema. Numa cadeia de transporte de gás natural a alta pressão, é aconselhável assumirem-se determinados valores que garantam a eficiência da análise e a integridade do problema. Tendo em mente estes requisitos, considerou-se um escoamento transiente lento para determinar as condições de trabalho e as flutuações temporais da carga face a certas imposições.

Nesta dissertação implementou-se um modelo matemático resolvido numericamente com elementos finitos para se analisar o transporte de gás natural em condutas, considerando um fluxo em regime permanente. O modelo utilizado baseia-se numa simplificação dos balanços de massa, quantidade de movimento e energia, para simular escoamentos compressíveis com transitórios lentos.

Adaptou-se um código preexistente, escrito em python, onde se procedeu a determinados aprimoramentos, como a alteração da função que produz as sub-rotinas dos diagramas de rede ou a optimização da montagem de matrizes das funções lineares. Simularam-se três casos distintos: o primeiro foi o estado actual da rede, seguindo-se a hipótese de entrada de um novo lote, que estabelece uma ligação entre Celorico da Beira e Vale de Frades, e consequentemente com a rede espanhola, em Zamora, e por fim considerou-se o caso hipotético anterior assumindo a válvula de Campo Maior fechada.

Das simulações foram retiradas várias conclusões. A rede de gasodutos está devidamente dimensionada, os valores de pressão encontram-se em conformidade com os requisitos e nunca são ultrapassados os valores máximos da capacidade total de injeção das estações de fornecimento. A entrada de um novo lote não trará consequências adicionais à rede, pelo que esta poderá

continuar a funcionar normalmente. Na última simulação percebeu-se que o fecho da válvula em Campo Maior implicará alterações na rede. Foram, portanto, testadas duas alternativas, onde se constatou a viabilidade da segunda.

Conceitos-chave: simulação de redes de gás natural, escoamento compressível, transitórios lentos.

Abstract

When the conception and management of a project involves high risks, it is necessary to simulate its structure and operating mode, allowing to both correct hypothetical errors and predict the system behavior. In a natural gas supply chain at high pressure, it is recommended to assume particular values that ensure both the analysis efficiency and the veracity of the problem. Taking into consideration the aforementioned requirements, it was employed a slow transient flow to determine the working conditions and its temporal fluctuations due to numerous impositions.

A finite element method with transient flow was implemented to analyse the natural gas transport inside the pipelines. A literature review regarding this method is presented, followed by a prediction of the possible cases that might occur inside the Portuguese national network. The numerical model used is based on a simplification of the balances of mass, momentum and energy for the simulation of slow transients of a compressible fluid.

A preexisting Python code has been adapted and further improved (solver modification, assembling optimization, ...). Three cases were simulated. Firstly, the actual network state was simulated, followed by the hypothetical introduction of a new lot that connects Celorico da Beira and Vale de Frades, and, as a consequence, the Spanish network in Zamora. The third simulation also included the lot between Celorico da Beira and Vale de Frades however, Campo Maior's valve was assumed to be closed.

The first simulation conclusions are threefold: the pipeline network is properly dimensioned; the pressure values are in conformity with the requirements; and, the maximum total injection capacity of the supply stations is never exceeded. The introduction of a lot that connects Celorico da Beira and Vale de Frades will not implicate additional consequences to the network, therefore being able to regularly work as part of the network. In the last simulation, it

was concluded that closing Campo Maior's valve would implicate changes in the network. Consequently, two alternatives were evaluated, upon which one could fulfill its requirements.

Keywords: simulations of natural gas networks, compressible flow, slow transients.

Agradecimentos

Primeiramente, quero manifestar a minha gratidão aos professores orientadores da minha dissertação. Ao professor Doutor João Henriques, pela sua disponibilidade e pelas críticas que me incentivaram a explorar abordagens diferentes e a adquirir novas metodologias de trabalho, e ao Professor Doutor Luís Gato, pelos casos de estudo sugeridos, que se poderão vir a tornar bastante relevantes na RNTGN num futuro próximo.

Quero agradecer também à minha família, nomeadamente pais, irmã e avós, pelo apoio e esperança depositados em mim e que, certamente, me ensinaram a ter um sentido de responsabilidade e dedicação e a ambição necessária para continuar a criar novos objectivos ao longo da minha vida.

Aos meus colegas de faculdade por me incentivarem a querer ser melhor e mais responsável, por me ajudarem em alturas que precisei, e pelo companheirismo ao longo do curso.

Por fim, resta agradecer aos meus amigos em tempos de lazer e aos do futebol e futsal por me fazerem divagar nas alturas certas, o que me permitiu continuar motivado.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento e motivação	1
1.1.1	Potencial energético	1
1.1.2	Redes de transporte e de distribuição em Portugal	3
1.2	Propósito e estrutura da tese	5
1.3	Desenvolvimento histórico	6
1.4	Indústria nacional	7
1.4.1	Desenvolvimento da indústria	8
1.4.1.1	Centros electroprodutores	10
1.4.1.2	Grandes clientes	11
1.4.1.3	Redes de distribuição	11
1.4.2	Fornecimento de gás natural	12
1.4.3	SNGN	12
1.4.3.1	Abastecimento e regaseificação de GNL	13
1.4.3.2	Armazenamento subterrâneo	13
1.4.3.3	Distribuição	14
1.4.3.4	RNTGN	14
2	Formulação	17
2.1	Regime não estacionário	17
2.1.1	Conservação da massa	18
2.1.2	Balanço da quantidade de movimento	19
2.1.3	Conservação da energia	20
2.1.4	Equação de estado	21
2.2	Escoamentos transientes lentos	22
2.3	Modelação	24

2.3.1	Equação da conservação da massa simplificada	25
2.3.2	Equação do balanço da quantidade de movimento simplificada	25
2.3.3	Modelo matemático	25
2.4	Métodos numéricos	26
2.4.1	Método dos elementos finitos (MEF)	27
2.4.1.1	Implementação do MEF	28
2.4.1.2	Condições de fronteira	30
2.5	Implementação computacional	31
2.5.1	Algoritmo	31
2.5.2	Resolução do sistema algébrico	32
2.5.2.1	Coefficientes das matrizes esparsas	32
2.5.2.2	Factorização LU	33
3	Simulações	35
3.1	RNTGN em 2018	36
3.2	Adição do lote 9 à rede	40
3.3	Interrupção da ligação de Campo Maior	43
3.3.1	Alternativa 1	46
3.3.2	Alternativa 2	49
4	Conclusões	55
A	Coefficiente de atrito	57
B	Conservação do caudal nos nós	59
C	Diagramas da rede	61
	Bibliografia	69

Lista de Figuras

1.1	Evolução da influência dos diversos tipos de energia, em Portugal.	1
1.2	Evolução do consumo de energia primária, em Portugal.	2
1.3	(a) Evolução da importação de gás natural, em Portugal, entre 2005 e 2014; (b) evolução das importação total de energia, em Portugal, entre 1997 e 2015.	8
1.4	Importações dos diversos recursos usados em Portugal.	9
1.5	Balanco inicial dos clientes da Transgás, actualmente a Galp.	9
1.6	Influência de cada classe no consumo de gás natural, em Portugal.	10
1.7	Consumo de gás natural por segmento, em Portugal.	10
1.8	Importação de gás natural.	12
2.1	Volume de controlo de uma conduta de gás natural.	18
2.2	Influência da força da gravidade com a variação da altura.	24
2.3	Elementos e nós num domínio hipotético	27
2.4	Funções base lineares	29
2.5	Assemblagem da matriz A	30
3.1	Flutuação da pressão ao longo de uma semana de trabalho da rede na configuração de hoje em dia (figuras (a) e (b)).	37
3.1	Flutuação da pressão ao longo de uma semana de trabalho da rede na configuração de hoje em dia (figuras (c) a (f)).	38
3.2	Flutuação do caudal mássico ao longo de uma semana de trabalho da rede na configuração de hoje em dia.	39
3.3	Flutuação da pressão ao longo de uma semana de trabalho da rede supondo a adição do lote 9 entre Celorico da Beira e Vale de Frades (figuras (a) a (d)).	41
3.3	Flutuação da pressão ao longo de uma semana de trabalho da rede supondo a adição do lote 9 entre Celorico da Beira e Vale de Frades (figuras (e) a (h)).	42

3.4	Flutuação do caudal mássico ao longo de uma semana de trabalho da rede na configuração de hoje em dia, no terminal de Sines.	43
3.5	Flutuação da pressão ao longo de uma semana de trabalho da rede supondo a adição do lote 9 entre Celorico da Beira e Vale de Frades e o fecho da válvula em Campo Maior (figuras (a) a (d)).	44
3.5	Flutuação da pressão ao longo de uma semana de trabalho da rede supondo a adição do lote 9 entre Celorico da Beira e Vale de Frades e o fecho da válvula em Campo Maior (figuras (e) a (h)).	45
3.6	Flutuação da pressão ao longo de uma semana de trabalho da rede supondo a adição do lote 9 entre Celorico da Beira e Vale de Frades, o fecho da válvula em Campo Maior e o paralelo de condutas entre Sines e Cartaxo (figuras (a) a (d)).	46
3.6	Flutuação da pressão ao longo de uma semana de trabalho da rede supondo a adição do lote 9 entre Celorico da Beira e Vale de Frades, o fecho da válvula em Campo Maior e o paralelo condutas entre Sines e Cartaxo (figuras (e) a (h)).	47
3.7	Comparação da flutuação do caudal mássico ao longo de uma semana de trabalho em Sines, quando se fecha a válvula em Campo Maior e para a sua alternativa.	48
3.8	Flutuação da pressão ao longo de uma semana de trabalho da rede supondo a adição do lote 9, o fecho da válvula em Campo Maior, o paralelo condutas entre Sines e Cartaxo e a imposição de pressões em Vale de Frades e Valença do Minho (figuras (a) a (d)).	50
3.8	Flutuação da pressão ao longo de uma semana de trabalho da rede supondo a adição do lote 9, o fecho da válvula em Campo Maior, o paralelo condutas entre Sines e Cartaxo e a imposição de pressões em Vale de Frades e Valença do Minho (figuras (e) a (h)).	51
3.9	Flutuação do caudal mássico ao longo de uma semana de trabalho da rede supondo a adição do lote 9, o fecho da válvula em Campo Maior, o paralelo condutas entre Sines e Cartaxo e a imposição de pressões em Vale de Frades e Valença do Minho.	52
A.1	Diagrama de Moody.	57
B.1	Esquema da rede de gás composta por três condutas.	59
C.1	Diagrama da rede ibérica de gasodutos.	62
C.2	Diagrama da RNTGN.	63
C.3	Diagrama detalhado da RNTGN (2013).	64

C.4	Diagrama do lote 9 da RNTGN.	65
C.5	Diagrama detalhado de consumos e pressões da RNTGN.	66
C.6	Diagrama detalhado de consumos e pressões da RNTGN, tendo em consideração a hipotética entrada em funcionamento do lote 9.	67
C.7	Diagrama detalhado de consumos e pressões da RNTGN, tendo em consideração a hipotética entrada em funcionamento do lote 9 e um possível fecho da rede em Campo Maior.	68

Lista de Tabelas

1.1	Lotes da RNTGN	16
-----	--------------------------	----

Nomenclatura

Abreviaturas

ED	Equação Diferencial
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
GNL	Gás Natural Liquefeito
GRMS	<i>Gas Reduction and Measure Station</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
RNTGN	Rede Nacional de Transporte de Gás Natural
SNGN	Sistema Nacional de Gás Natural

Símbolos romanos

A	área (m ²)
a	variável auxiliar
$\mathbf{A}$	matriz de assemblagem
$\mathbf{b}$	vector dos termos independentes
c	velocidade de propagação do som (m/s)
$\mathbf{C}^e$	matriz de massa do elemento, e
D	diâmetro (m)
E	energia total específica (J/kg)
f	factor de fricção
$\mathbf{F}$	vector de forças
g	aceleração da gravidade (m/s ²)
$\hat{h}$	entalpia específica (J/kg)
h_e	comprimento do elemento, e
H	entalpia total específica (J/kg)
$\mathbf{K}^e$	matriz de rigidez do elemento, e
L	comprimento de uma conduta (m)
$\mathbf{L}$	matriz triangular inferior
$\dot{m}$	caudal mássico (m ³ /s)
n	número de moles (mol)
p	pressão (bar)
$\mathbf{P}$	matriz de permutação por linha
q	fluxo de calor (J/(m ²))
Q	energia sob a forma de calor (J)
R	constante do gás (440,737 m ² /(s ² K))
Re_D	número de Reynolds
t	tempo (s)
T	temperatura absoluta (K)
u	velocidade do escoamento em x (m/s)
$\hat{u}$	energia interna específica (J/kg)
$\mathbf{U}$	matriz triangular inferior
V	volume (m ³)
W	energia sob a forma de trabalho (J)
x	coordenada axial (m)
$\mathbf{x}$	vector das incógnitas

z	coordenada vertical (m)
$\mathbf{z}$	vector dos termos independentes
Z	factor de compressibilidade (0,83)

Símbolos gregos

α	variável auxiliar
β	variável auxiliar
γ	razão de calores específicos (1,417)
δ	contribuição dos termos no balanço da quantidade de movimento (%)
δ_{ii}	delta de Kronecker
Δt	intervalo de tempo (s)
ϵ	rugosidade
θ	ângulo da conduta em relação à horizontal (°)
ρ	massa volúmica do gás (kg/m ³)
ϕ	função de forma
ϕ_i, ϕ_j	função de teste
Ω	domínio de cálculo
Ω_e	subdomínio do elemento, e
σ	variável auxiliar

Índices superiores

b	variável auxiliar
e	elemento finito
n	passo no tempo

Índices inferiores

0	início de uma conduta
a	atrito
A	área
D	diâmetro
e	elemento finito
g	gravítico
i, j	nós de entrada e de saída, respectivamente
ij	troço de conduta entre os nós i e j
L	fim de uma conduta
n	condições normais
s	exterior
v	tensões viscosas
V	volume

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento e motivação

1.1.1 Potencial energético

No dia 18 de Outubro de 1973 iniciou-se a primeira crise de petróleo, que ficou conhecida como a crise petrolífera de 1973. A Guerra de Yom Kippur, ou Guerra de Outubro, incentivou os membros da OAPEC (Organização dos Países Árabes Exportadores de Petróleo) a declarar o seu embargo. No final dessa mesma década, devido à revolução iraniana, surge a segunda grande crise. Estes dois acontecimentos levaram à alteração das políticas energéticas adoptadas pelos países ocidentais.

A escassez do petróleo e o respectivo aumento acentuado do preço do barril obrigaram a uma procura de substitutos e de um ambiente que permitisse obter um aumento da eficiência energética. Verificou-se uma diminuição do peso do petróleo relativamente ao consumo de energias primárias em todo mundo, nomeadamente na União Europeia, tendo sido substituído por gás natural, energia nuclear e carvão [1].



Figura 1.1: Evolução da influência dos diversos tipos de energia, em Portugal (adaptado de [2]).

Actualmente, em Portugal e contrariamente às políticas adoptadas por muitos países da União Europeia, o petróleo continua a ser o principal interveniente, representando, em 2013, cerca de 48% do consumo total de energia primária. Não obstante, é importante realçar a aposta em outras fontes que têm vindo a ganhar o seu espaço: o gás natural sofreu um aumento de 4% e as energias renováveis de 10%, entre 2004 e 2013 (figura 1.1).

Na figura 1.2 confirma-se que, a partir de 1985, se começou a substituir o petróleo por carvão devido à exploração iniciada na central eléctrica de Sines. Em 1989, graças ao investimento em energia da biomassa, e mais tardar, em 1997, derivado da iniciação do abastecimento de gás natural no mercado português, pôde-se observar um decréscimo acentuado da influência do petróleo. É importante referir que a Guerra do Iraque, começada a 20 de Março de 2003, teve, obviamente, um forte papel nesta redução abrupta.

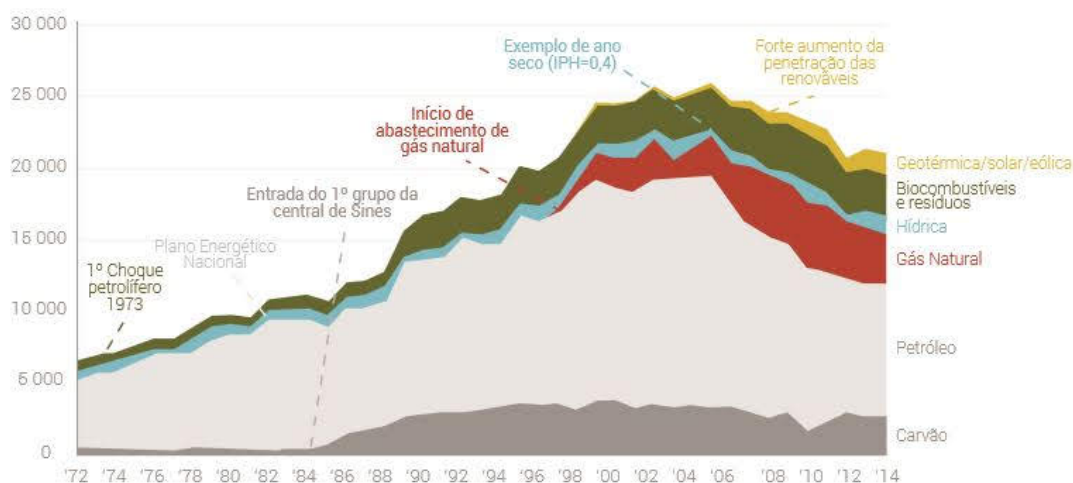


Figura 1.2: Evolução do consumo de energia primária, em Portugal (adaptado de [3]).

Dos indicadores anteriormente enunciados, conclui-se que o consumo de gás natural em Portugal tem aumentado significativamente nos últimos anos, adoptando um papel cada vez mais relevante no seio das principais fontes de energia primária.

A nível mundial, o consumo de gás natural como energia primária manteve-se aproximadamente constante nesta última década, correspondendo a um total percentual de cerca de 21,6%, reforçando a sua importância comparativamente a outro tipo de energias [4]. O gás natural é visto como um dos principais contribuintes para um país que ambicione uma segurança e crescimento económicos e um crescimento e sustentabilidade ambientais.

1.1.2 Redes de transporte e de distribuição em Portugal

O desenvolvimento das redes de transporte e de distribuição de gás natural em Portugal tardou a acontecer por causa das propriedades mecânicas dos tubos bem como das respectivas articulações [1]. Os gasodutos apenas obtiveram a sua expansão quando findada a Segunda Guerra Mundial. O desenvolvimento tecnológico resultante da guerra permitiu uma aplicação noutras áreas como a metalurgia e a soldadura proporcionando, dessa forma, um célere crescimento das redes de transporte. Uma vez expandidas estas cadeias de distribuição, houve uma afluência por parte da indústria energética. Inicialmente, foram as centrais térmicas a recorrer primeiro às suas propriedades. Mais tarde, devido à exploração do ciclo combinado, cujo rendimento é consideravelmente superior ao de uma central convencional, percebeu-se que o sector que poderia evoluir mais era o de energia eléctrica e passou, dessa forma, a ser a sua principal aplicação.

Na pluralidade dos países, as cadeias de transporte e de distribuição de gás suportam-se num número grande de redes de condutas integradas, que operam numa vasta gama de pressões. A crescente procura de gás levou à evolução dos sistemas de transporte e de distribuição, sendo que estas últimas, podem provocar problemas associados à operação racional das redes, de modo a garantir, por um lado, fornecimento adequado de gás aos consumidores e, por outro, reduzidos custos de operação [5]. O desenvolvimento adequado de um sistema, assim como, a sua exploração economicamente racional, só poderão ser possíveis recorrendo a simulações computacionais.

Estas simulações das redes de gás baseiam-se na aplicação de modelos de escoamento em gasodutos, tendo como suporte leis físicas que controlam a respectiva evolução do escoamento. Estas abordagens permitem prever o comportamento das cadeias de gás face condições diferenciadas, facultando a possibilidade dessas previsões poderem vir a ser usadas na tomada de decisões relativamente ao projecto e operação das redes [5]. No projecto da rede, a simulação permite seleccionar a própria estrutura, bem como os parâmetros da geometria das condutas caso sejam conhecidas as variáveis de fornecimento e procura de gás. Outra vantagem destes modelos é a facilidade na escolha do local onde serão instaladas as unidades (compressores, válvulas, reguladores de pressão, etc). Para que o controlo de um sistema de transporte de gás seja realista, é necessário obter informação relativa às pressões e caudais em determinados pontos da rede.

Consoante o modelo de escoamento no sistema, pode-se estar perante o estado estacionário (permanente) ou o não estacionário (transiente). É um facto comprovado que o escoamento em gasodutos é transiente. Como tal, as condições variam temporalmente, por mais suaves que sejam as mudanças. Quando se modelam redes complexas, é muitas vezes conveniente desprezar alguns termos do escoamento transiente, que sob condições especiais, facultam resultados adequados [6].

O escoamento em regime permanente é descrito por um conjunto de equações algébricas não lineares. Em problemas deste tipo, as transferências de energia não são funções do tempo, assim como as variáveis que fazem parte do sistema, *i.e.*, a pressão em cada nó e o caudal ao longo de cada elemento. Este modelo é comumente utilizado, assumindo-se como uma referência em muitos métodos tradicionais, já que é relativamente simples de aplicar e conceptualmente mais trivial de compreender. Todavia, em alguns sistemas, a parte dinâmica não pode sofrer simplificações sem que sejam cometidos erros grosseiros. Os efeitos dinâmicos são particularmente importantes quando se calculam as consequências das avarias ou outras lacunas da rede, tal como a diminuição temporária do abastecimento por causa do defeito de um componente [6].

Quando se analisa um escoamento transiente, é perceptível a ocorrência de perturbações rápidas e lentas. As perturbações rápidas resultam de impulsos, causados pelo fecho repentino de uma válvula, pelo início de funcionamento da rede ou pela ruptura de um gasoduto. As perturbações lentas derivam, habitualmente, de variações de pressão e caudal originadas pela alteração cíclica diária da procura de gás [7]. Este tipo de variações é aquele que tem um maior contributo em cadeias de transporte de gás a alta pressão.

Com o gradual aumento dos consumos, a capacidade de fornecimento de gás a pressões de contrato durante períodos de consumo de pico reduz. Em resposta a esta situação, uma maior oscilação da capacidade da rede tem de ser fornecida [6]. Para o respectivo sucesso do sistema, é necessário que os transientes tenham mais impacto, o que implica um maior cuidado na sua computação. Estes modelos são compostos por uma ED das derivadas parciais ou por um sistema composto por elas. As hipóteses assumidas, tendo em conta as condições de operação da rede, é que definem a forma destas equações. Por todas as razões enunciadas anteriormente, é facilmente compreensível a superior complexidade computacional de um regime transiente em

relação a um estacionário.

A quantidade de gás acumulada numa conduta é bastante utilizada nos sistemas complexos de condutas, permitindo fornecer gás minimizando as emissões. Esta modelação é conhecida como *linepack*. Caso a pressão diminua, significa que se está a fornecer gás à rede e que a respectiva procura é elevada (muitos consumos). A situação oposta sugere acumulação de gás que acontece em resultado de consumos reduzidos.

As razões que levam ao desenvolvimento de um simulador de redes de gás podem ser as mais variadas, no entanto as mais comuns são as seguintes: previsão da evolução da rede, impacto da adição de novas centrais de ciclo combinado ou do desmantelamento/alteração do funcionamento de existentes e agregação às redes de outro país.

1.2 Propósito e estrutura da tese

O conceito desta dissertação passa pela modelação matemática, de um escoamento não estacionário de uma rede de transporte de gás a alta pressão. Para que este objectivo fosse concretizado, recorreu-se a um programa preexistente, o qual se tentou melhorar. As duas fases principais que se pretendem analisar são a capacidade e o comportamento transiente da rede nacional, bem como a sua capacidade, tendo em conta algumas hipóteses.

Esta tese encontra-se dividida em quatro capítulos: introdução, formulação matemática, simulações e conclusão, respectivamente. No final, poderão ser encontrados nos anexos esclarecimentos acerca de determinados passos que foram tomados, assim como algumas informações adicionais sobre a rede nacional e a respectiva evolução.

No segundo capítulo estão apresentadas as equações regentes em escoamento não estacionário, com as respectivas simplificações para um regime lento, e o modelo numérico que descreve o escoamento em condutas de gás. De referir que se encontra descrita a aplicação dos métodos numéricos bem como a implementação do código, recorrendo a elementos finitos.

O capítulo seguinte é onde se encontra a apresentação dos casos hipotéticos e das respectivas características de cada um, sendo discutidos e comparados os resultados obtidos para cada caso.

A última secção é composta pelos pontos conclusivos retirados da discussão de resultados das secções anteriores, bem como uma proposta de possíveis abordagens adoptadas futuramente, em prole de um código mais fidedigno e, ao mesmo tempo, simplificado.

1.3 Desenvolvimento histórico

Seguindo uma lógica de proximidade, é facilmente perceptível que, quando se deu início às actividades comerciais de gás natural, os primeiros consumidores se encontravam sediados próximo das redes de distribuição, que eram, principalmente, em antena, facilmente dimensionadas manualmente. A exploração da rede proporcionou experiência suficiente para que se pudessem resolver todos os inconvenientes que iam aparecendo. Com o desenvolvimento das redes, de forma a atingir uma maior população, foi necessário construir anéis de ligação, que foram tornando cada vez mais complexa a previsão do comportamento interno. Surgiu, desta forma, a necessidade de se simular o escoamento de gás natural.

No ano 1936, Hardy Cross desenvolveu o primeiro modelo numérico simulador de cadeias de distribuição em regime permanente [8], que ainda se encontra em uso actualmente. A invenção do computador veio acelerar processos, uma vez que poupou aos especialistas muitas horas de trabalho. É necessário lembrar que, numa fase inicial, devido à pouca capacidade dos computadores, apenas se conseguiam analisar redes pequenas. As mais complexas tinham de ser simplificadas.

O desenvolvimento progressivo informático proporcionou o uso de ferramentas cada vez mais poderosas em modelos de análise de redes de gás em regime estacionário. Este tipo de simulação oferece informações sobre a pressão e o caudal nos locais desejados da cadeia. Não obstante, estes valores variam diariamente e é preciso analisar a rede em intervalos de tempo. As redes são simuladas assumindo-se um escoamento permanente, onde são aplicadas condições de fronteira particulares. Caso as alterações do consumo sejam importantes, será necessário recorrer-se a uma simulação com escoamento transiente.

No final do século XX, foi necessário incrementar a modelação em regime transiente por causa de grandes câmbios do consumo na indústria. O recurso a gás natural como fonte de energia, impõe a construção de cadeias de transporte com alongamento elevado, devendo-se procurar soluções para o fornecimento dos consumidores [9, 10].

A implementação de uma conduta em regime não estacionário recorre a um modelo matemático, baseado nas equações fundamentais da dinâmica dos fluidos [11], considerando o fluido compressível [12]. Essas equações podem ser simplificadas assumindo-se um escoamento unidimensional, isotérmico ou adiabático [13], e desprezando alguns dos termos do balanço da quantidade de movimento [5, 10]. O termo relativo à inércia do gás pode ou não ser negligenciado, caso se esteja perante escoamentos lentos ou rápidos, respectivamente. Destes pontos resulta uma ED às derivadas parciais ou um sistema de ED às derivadas parciais .

Assumindo apenas o efeito de fricção nas paredes, tem-se que as flutuações do escoamento são lentas. No início dos anos oitenta, foi iniciada a construção de um método com base numa ED parcial, parabólica e de segunda ordem relativamente ao quadrado da pressão [14, 15, 16, 17]. Goldwater *et al.* desenvolveram um modelo do mesmo género do anterior, desta feita a relação era com a pressão e não com o seu quadrado [9]. Heath e Blunt [18], Taylor *et al.* [19] e Ziólko [20] construíram um método assumindo que a evolução da pressão do escoamento era causada pelas alterações abruptas do mesmo e pelos efeitos da fricção paredes, obtendo como resultado um sistema de ED quasi-lineares, hiperbólicas e de primeira ordem. Na possibilidade das condutas terem pequenas dimensões, ou quando a acção da fricção é reduzido, Carnyj [21] propôs que o efeito da fricção fosse desprezado em variações rápidas no escoamento, permitindo, assim, desenvolver um método descrito por uma ED parcial, hiperbólica e de segunda ordem.

Na resolução das expressões resultantes dos escoamentos não estacionários lentos é necessário recorrer-se a modelos numéricos [22] ou analíticos [23], conforme a complexidade das redes. Existem diversos métodos, sendo importante realçar os seguintes trabalhos: Osiadacz e Yedrouj [24] com os elementos finitos; Mekebel e Loraud [25], Abott [26], e Osiadacz [5] com o método das características; Berezin e Zhidkov [27] com o das linhas; e Osiadacz [5] com as diferenças finitas. Estes modelos têm vindo a ser utilizados em redes de extensão cada vez mais alongadas. Gato e Henriques [28] desenvolveram um modelo de elementos finitos para simular o escoamento com transientes rápidos, que será adaptado neste documento.

1.4 Indústria nacioanl

É de conhecimento geral que Portugal não possui jazidas de gás natural. No entanto, face à necessidade de existir energia limpa e eficiente, o governo decidiu importar gás natural,

maioritariamente originário de países africanos, nomeadamente Nigéria e Argélia.

Foi, portanto, preciso criar um projecto integrante económico que viesse, a longo prazo, aumentar o desenvolvimento social, causando bem-estar através de uma maior segurança do fornecimento energético [1]. Para que fosse economicamente viável, foi-lhe anexado, inicialmente, o sector de energia eléctrica (reduzidos custos e poluição quando comparado com o termoeléctrico), assegurando-se contractos a um fornecedor externo. As primeiras importações ocorreram em Janeiro de 1997, sendo o gás natural originário da Argélia e transportado pelos gasodutos da *Europe Maghreb Pipeline* (EMPL) até Marrocos. Aí, entrava em território espanhol através dos gasodutos *Al-Andaluz*, onde acabaria distribuído até Badajoz, entrando depois em Campo Maior.

Com a introdução de gás natural, criaram-se empresas com o objectivo de suprirem as necessidades do novo mercado: a GDP, essencialmente focada na distribuição, e a Transgás, dedicada à importação, transporte e fornecimento a grandes clientes [1]. Em 2001, estas empresas passaram a pertencer ao grupo Galp Energia, criada nesse ano, que criou uma nova estrutura empresarial no sector.

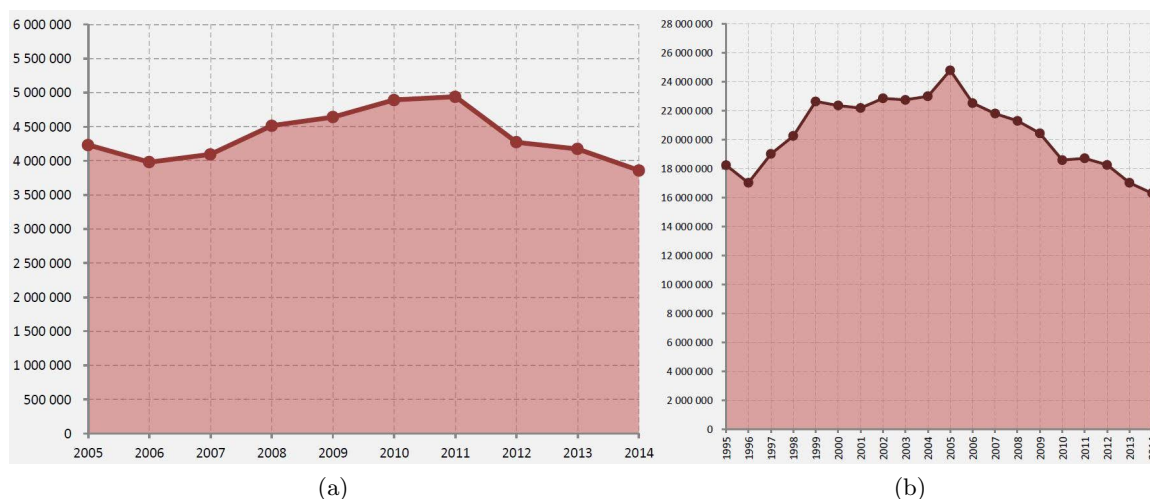


Figura 1.3: (a) Evolução da importação de gás natural, em Portugal, entre 2005 e 2014; (b) evolução das importações totais de energia, em Portugal, entre 1997 e 2015 (adaptado de [35]).

1.4.1 Desenvolvimento da indústria

Anteriormente já havia sido referido o ano de introdução de gás natural em Portugal: 1997. O consumo teve um aumento progressivo tornando-se uma das principais fontes de energia (figura

1.3). Em 2014, o gás natural era responsável por 15,8% do fornecimento de energia primária total, como pode ser visto na figura 1.4.

	Carvão	Petróleo	Gás Natural	Electricidade	Calor	Renováveis	Resíduos	TOTAL
Importações	2 712 212	15 203 382	3 487 318	623 212		75 096	24 213	22 125 433

Figura 1.4: Importações dos diversos recursos usados em Portugal (adaptado de [34]).

O consumo de gás natural em Portugal, pode ser separado em três grupos principais: os centros produtores de energia eléctrica, os grandes clientes e as redes de distribuição. A figura 1.5 demonstra a gradual evolução do número de clientes, das três classes referidas anteriormente, até ao seu ponto de estagnação, que se ocorreu em 2003, aproximadamente.

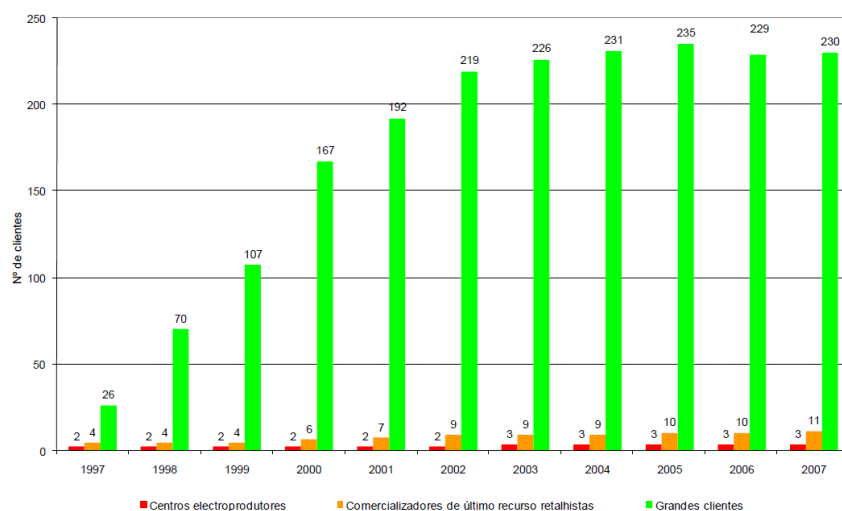


Figura 1.5: Balanço inicial dos clientes da Transgás, actualmente a Galp (adaptado de [1]).

Uma boa forma de compreender a contribuição de cada segmento é através de um histograma percentual, *i.e.*, o consumo de cada grupo em função da quantidade total, em termos percentuais. Analisando a figura 1.6, percebe-se que, desde 2012, os centros produtores de energia eléctrica passaram a ser o sector menos influente. Este sector, aquando da introdução de gás natural em Portugal, era o principal contribuinte. Isto deve-se, principalmente, a países como o Japão que no Inverno de 2014, que foi considerado bastante frio, estiveram dispostos a gastar muito mais que o preço de mercado para o importarem para si. Existiu, então, a necessidade de reduzir os consumos de gás natural em Portugal e, obviamente, não iriam cortar nas redes de distribuição e grandes clientes devido à importância económica que estes trazem. As redes de distribuição são o principal contribuinte do consumo de gás natural, que se tem mantido aproximadamente constante, cerca de 50%.

Serve a figura 1.7 para reforçar aquilo que foi dito anteriormente. Ora, as redes de distribuição

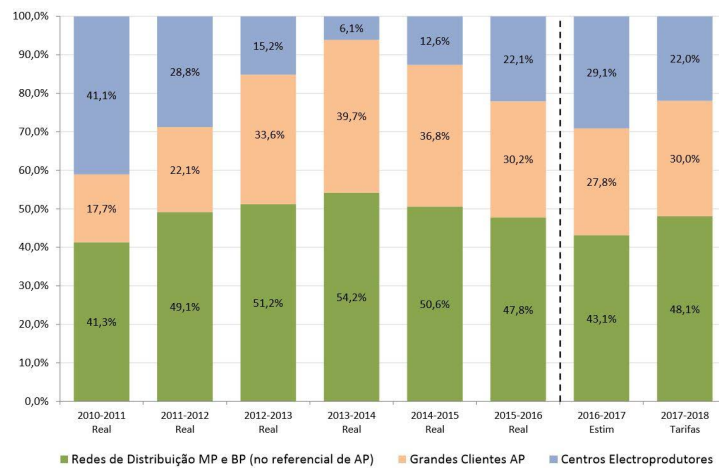


Figura 1.6: Influência de cada classe no consumo de gás natural, em Portugal (adaptado de [34]).

apresentaram um consumo na ordem dos 24 TWh nos últimos três anos, enquanto que as outras duas classes têm apresentado algumas flutuações. Considerando aquilo que foi dito no parágrafo anterior, nota-se que os grandes clientes têm apresentado uma redução de 1% dos consumos, anualmente, e que os centros electroprodutores estão, neste momento, a tender para a sua estabilização.

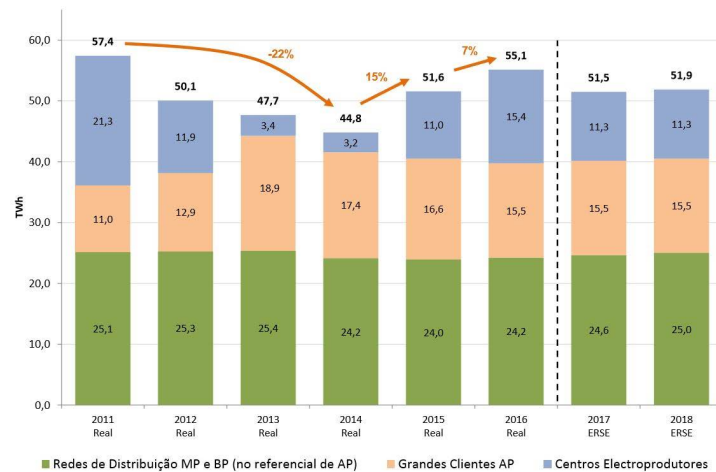


Figura 1.7: Consumo de gás natural por segmento, em Portugal (adaptado de [34]).

1.4.1.1 Centros electroprodutores

Os centros de produção eléctrica consumidores de gás natural, existentes em Portugal em 2017, são:

- **Central do Carregado** - Central convencional de turbina a vapor, com uma potência de 250 MW.

- **Central termoelétrica da Tapada do Outeiro** - Central de ciclo combinado, com uma potência de 990 MW.
- **TER (Termoelétrica do Ribatejo)** - Central de ciclo combinado, com uma potência de 1176 MW.

Para o próximo ano civil espera-se que a Central termoelétrica da Tapada do Outeiro venha a ter um factor de utilização da capacidade total na ordem dos 33%, enquanto as restantes se ficam pelos 16% [34].

1.4.1.2 Grandes clientes

Este grupo é constituído por grandes indústrias, nomeadamente a de cogeração, a vidreira e a de cerâmica. As duas últimas atingiram o seu pico em 2015 enquanto que a primeira o atingiu em 2011 quando a Galp investiu nas refinarias de Sines e Matosinhos. Desde aí, tem-se vindo a notar uma redução constante do seu consumo.

1.4.1.3 Redes de distribuição

Existem onze redes de distribuição a operar em Portugal:

- *Beiragás.*
- *Dianagás.*
- *Duriensegás.*
- *Medigás.*
- *Lisboagás.*
- *Lusitaniagás.*
- *Paxgás.*
- *Portgás/EDPgás.*
- *Setgás.*
- *Sonorgás.*
- *Tagusgás.*

A Lisboagás, a Lusitaniagás, a Portgás e a Setgás foram aquelas que iniciaram a distribuição e comercialização, em 1997, enquanto as restantes apenas começaram a funcionar a partir de 2000. A Paxgás foi última rede a ter início, em 2008.

Face à enorme indústria circundante, é facilmente perceptível que a EDPgás é a maior rede distribuidora do país, seguindo-se-lhe a Lisboagás e a Lusitaniagás. Estas três apresentam

consumos bastante superiores face às restantes [34]. Estas três distribuidoras alcançam as zonas de maior densidade populacional e, principalmente, industrial.

Na figura 1.7, a previsão do aumento do consumo nesta classe deve-se ao facto de se esperar um aumento do consumo na rede Sonorgás, devido ao abastecimento de mais 18 novos polos.

1.4.2 Fornecimento de gás natural

País de origem	2011	2012	% 2012/_11	2013	% 2013/_12
Argélia	1 814 369	1 981 018	+9,2	2 060 572	+4
Catar		155 434		305 736	+96,7
Egipto		102 453		81 420	-20,5
Nigéria	2 719 030	1 756 930	-35,4	1 026 950	-41,5
Noruega				233 793	
Trinidade e Tobago		73 938		73 354	-0,8
País não especificado	406 264	203 600	-49,9	392 375	
Total	4 939 663	4 273 373	-13,5	4 174 200	-2,3

Os valores correspondem às quantidades que fisicamente entraram no território nacional

Figura 1.8: Importação de gás natural (em $10^3 \text{ m}^3(\text{n})$) (adaptado de [2]).

Portugal foi abastecido pela primeira vez pela empresa Sonatrach, através da jazida de Hassi R'Mel, na Argélia. O gás natural foi transportado nas condutas de Maghreb até Tânger, onde foi comprimido, sendo, posteriormente, transportado até Tarifa. Aí, entrou num gasoduto em direcção a Badajoz, entrando em território nacional em Campo Maior. A Argélia é o grande distribuidor, introduzindo em Portugal cerca de 2000 milhões de $\text{m}^3(\text{n})$ de gás natural em 2013 (figura 1.8).

O outro grande fornecedor é a Nigéria abastecendo, em 2013, cerca de 1000 milhões de $\text{m}^3(\text{n})$ de gás natural liquefeito (GNL) que chega em navios transportadores ao terminal de Sines, onde volta a ser gaseificado e enviado de seguida para a rede. O restante foi dividido entre países como o Catar e a Noruega. Portugal tem capacidade para importar cerca de 9000 milhões de $\text{m}^3(\text{n})/\text{ano}$.

1.4.3 SNGN

O sistema nacional de gás natural (SNGN) encontra-se dividido em seis sectores:

- *Recepção, armazenamento e regaseificação de GNL.*

- *Armazenamento subterrâneo de GN.*
- *Transporte de GN.*
- *Distribuição de GN.*
- *Comercialização de GN.*
- *Operação dos mercados de GN.*

1.4.3.1 Abastecimento e regaseificação de GNL

Como já foi referido anteriormente, o GNL é recebido no terminal de Sines. As principais funções desta infraestrutura são as seguintes:

- recepção do GNL nas infraestruturas portuárias de descarga de navios transportadores de metano, cuja capacidade de armazenamento vai dos 40000 m³(n) aos 165000 m³(n);
- armazenamento do GNL em três reservatórios, dois deles com uma capacidade total de 120000 m³(n) cada e o terceiro com 150000 m³(n);
- regaseificação do GNL, através da troca de calor com a água do mar, seguindo-se a emissão de gás natural para a rede de alta pressão, no ponto de entrega, e transporte em camiões cisterna.

A emissão média de gás natural para o gasoduto é de 670000 m³(n)/h. A estação de enchimento de camiões cisterna pode abastecer dois camiões a 50 m³(n)/h. No dia 12 de Janeiro de 2017, o terminal atingiu a sua capacidade máxima de emissão, ou seja, 1,35 milhões de m³(n)/h e em dias mais frios atinge facilmente os 90% da sua capacidade de emissão.

1.4.3.2 Armazenamento subterrâneo

Esta infraestrutura tem como objectivo garantir a segurança no abastecimento assim como na acessibilidade dos utilizadores. Está localizada em Carriço, freguesia de Pombal, num ambiente com formações salinas, onde os terrenos estão acumulados com uma elevada quantidade de sal-gema. Estudos indicaram esta zona como a ideal do ponto de vista económico e da sustentabilidade ambiental.

Esta plataforma é constituída por seis cavernas subterrâneas, de geometria cilíndrica, situadas a elevada profundidade, que se encontram interligadas a uma estação de gás que gere as quantidades armazenadas através de processos de extração ou injeção. A capacidade máxima de armazenamento de todas as cavidades ronda os 333 milhões de m³(n), a uma pressão de 180

bar.

A injeção é feita com recurso a compressores de gás natural, tendo uma capacidade máxima de fornecimento de $84000 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$, enquanto que a a extracção usufrui de sistemas de desidratação do gás natural para posterior injeção na rede de transporte, podendo abastecer um máximo de $300000 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$. No ano de 2015, a quantidade média diária armazenada foi cerca de 6,5 milhões de $\text{m}^3(\text{n})/\text{h}$.

1.4.3.3 Distribuição

Só existem duas formas de transportar gás natural dentro de Portugal:

- **Rede Nacional de Transporte de Gás Natural (RNTGN)** - o gás é transportado pela rede de condutas de alta pressão (superior a 40 bar) abastecendo entidades distribuidoras e grandes clientes conectados à rede primária.
- **Camiões cisterna** - o gás liquefeito é transportado até às Unidades Autónomas de Gás (UAG).

A sua gestão passa por cumprir certos requisitos [1]:

- receber o fluido a um ritmo aproximadamente constante;
- colmatar as flutuações sazonais e diárias de consumo;
- garantir o transporte entre os locais de aprovisionamento e as redes de distribuição e grandes clientes;
- minimizar perdas;
- garantir condições de segurança.

1.4.3.4 RNTGN

A rede nacional de transporte é uma cadeia de condutas de gás a alta pressão com dois pontos de recepção: terminal de Sines e o acesso a Espanha em Campo Maior. Estes dois pontos estão conectados à rede por estações de medição e redução de pressão, convergindo nos centros electroprodutores, aos grandes clientes e às condutas de média e baixa pressão.

No final de Janeiro de 1997, após ser concluída a construção do gasoduto que liga Campo maior a Leiria, a rede entrou em funcionamento. Os pontos de conexão que se seguiram foram Setúbal, em Março, e Valongo, em Abril. Foi nesta altura que se começou o abastecimento regular ao primeiro cliente industrial, a Volkswagen Autoeuropa, sediada na Quinta da

Marquesa, Palmela; e da primeira distribuidora regional, a Portgás. Ainda nesse ano, iniciam-se os dois primeiros centros produtores de energia eléctrica: a central da Tapada do Outeiro e a central do Carregado.

A RNTGN é constituída pelos seguintes componentes:

- **1375 quilómetros de gasoduto principal e ramais**, divididos em sete partições com tubagens cujo diâmetro nominal varia entre os 150 e os 800 mm. Mais de metade destas condutas tem 700 mm de diâmetro;
- **2 centros de despacho**, cujo principal fica em Bucelas, Loures, e o de recurso em Pombal. Estes centros têm as seguintes funções: garantir o controlo e o transporte do sistema, monitorizar a operação, equilibrar as provisões e os requisitos de entrega aos consumidores finais;
- **4 centros de operação e manutenção**, que servem de suporte às equipas de trabalho no exterior, assegurando a integridade do sistema. Estas equipas realizam a vigilância das condutas e dos ramais industriais e das operações locais e asseguram, ainda, a manutenção dos aparelhos;
- **45 estações de seccionamento (BV)**. O seu propósito é o seccionamento e a despressurização dos segmentos das tubagens;
- **66 estações de derivação (JCT)**, cujo papel é a conexão às derivações e aos ramais de distribuição local;
- **85 estações de regulação e medição de gás (GRMS)**. Têm como finalidade diminuir e controlar a pressão do gás nas condutas de alta pressão, assim como regular o fornecimento do gás.
- **2 estações de transferência de custódia (CTS)**. São os locais de conexão à rede espanhola.

A tabela 1.1 e a figura C.2 do anexo C descrevem o percurso dos oito lotes, bem como a entrada do nono, que liga Celorico da Beira a Vale de Frades, pertencente ao concelho do Vimioso, e ainda se encontra em fase de aceitação, por causa do possível impacto ambiental que possa vir a existir. No entanto, a estimativa é que este lote possa entrar em vigor no ano 2022.

As tubagens da rede precisam de possuir determinadas características para assegurar a integridade do sistema, face ao investimento realizado, e a segurança das pessoas. Tendo em conta as condições, as condutas são construídas com aços de alta resistência, revestidos na face interna com uma resina *epoxy*, que torna as paredes mais macias e estanques, reduzindo, dessa

Lote	Troço	Ano de entrada em operação	Diâmetro (mm)
1	Setúbal - Leiria	1997	700
2	Leiria - Braga	1997	500 e 700
3	Campo Maior - Leiria	1997	700
4	Braga - Tuy	1998	500
5	Portalegre - Guarda	2001	300
6	Coimbra - Viseu	1999	500
7	Sines - Setúbal	2003	800
8	Mangualde - Celorico	2013	500
	Guarda - Celorico		300
9	Celorico - Vimioso	2022	700

Tabela 1.1: Lotes da RNTGN

forma, o atrito. A face exterior dos gasodutos é revestida por três camadas de polietileno que proporcionam uma óptima resistência à corrosão.

O transporte de gás, dentro das condutas, é realizado numa gama de temperaturas próximas dos 10 °C e uma pressão variável que pode atingir os 80 bar, mas não menos de 40. A profundidade mínima a que o gasoduto se encontra são 800 mm e para além dos diâmetros apresentados na tabela 1.1, existem ainda valores de 600 e 200 mm na rede e 250 mm nos ramais industriais.

A RNTGN está conectada à rede espanhola em Campo Maior, onde se liga ao gasoduto de Badajoz, e em Valença do Minho, onde se liga ao gasoduto de Tuy, (figura C.1). Relativamente aos pontos de entrada de gás natural na RNTGN, estes são 2:

- **Campo Maior** - capacidade de importação de 4500 milhões de m³(n)/ano.
- **Terminal de GNL de Sines** - capacidade de importação de 11826 milhões de m³(n)/ano.

Valença do Minho actua, geralmente, como ponto de saída de gás natural, todavia, podem existir situações em que a situação inversa ocorre. Recorrendo ao anexo C, podem-se observar as figuras C.2 e C.3 onde são apresentados os mapas detalhados da RNTGN, com informação relativa às suas características e infraestruturas.

Capítulo 2

Formulação

Realizando uma alusão àquilo que foi dito no capítulo 1, não é demais repetir que a modelação numérica do escoamento de gás natural em regime não estacionário num gasoduto é descrito por uma ED das derivadas parciais, ou por um sistema composto por equações do mesmo tipo. Consoante as hipóteses consideradas para as condições de funcionamento da rede, a geometria das equações também se altera. Estas podem ser hiperbólicas ou parabólicas [5].

2.1 Regime não estacionário

Numa primeira fase, é de extrema importância ter noção da natureza do estudo que se planeia realizar, bem como das propriedades físicas do sistema. Neste caso não será diferente, pelo que se assume o escoamento transiente e unidimensional. Consequentemente, a pressão dependerá do tempo, t , e da distância ao longo do eixo da conduta, x . Será, ainda, assumido um fluido compressível e um escoamento isotérmico, que a secção transversal das condutas não varia, e que as propriedades físicas do gás são constantes, nomeadamente, o γ , o R e o Z .

Os fenómenos que governam o escoamento de gás natural em gasodutos, suportam-se em três pilares fundamentais da dinâmica de fluidos:

- **Conservação da massa.**
- **Balanco da quantidade de movimento.**
- **Conservação da energia.**

O método numérico que se pretende escrever, apoia-se nos princípios referidos anteriormente, princípios esses que se expõem sob a forma de equações integrais, que sofrerão posteriormente simplificações com base nas hipóteses e considerações assumidas.

O escoamento de um gás numa conduta trata-se de um tema qualitativamente complexo, nomeadamente quando existem articulações e outros elementos que podem alterar as propriedades do próprio escoamento. Todavia, assumindo um gasoduto alongado, de tal forma que o seu raio de curvatura é muito superior ao seu diâmetro, é possível assumir um escoamento totalmente desenvolvido, uniforme e unidimensional. Quando se está perante este cenário, é necessário considerar a pressão, $p = p(x, t)$ e a velocidade média $u = u(x, t)$, na secção, em função da coordenada axial x e do tempo t (figura 2.1).

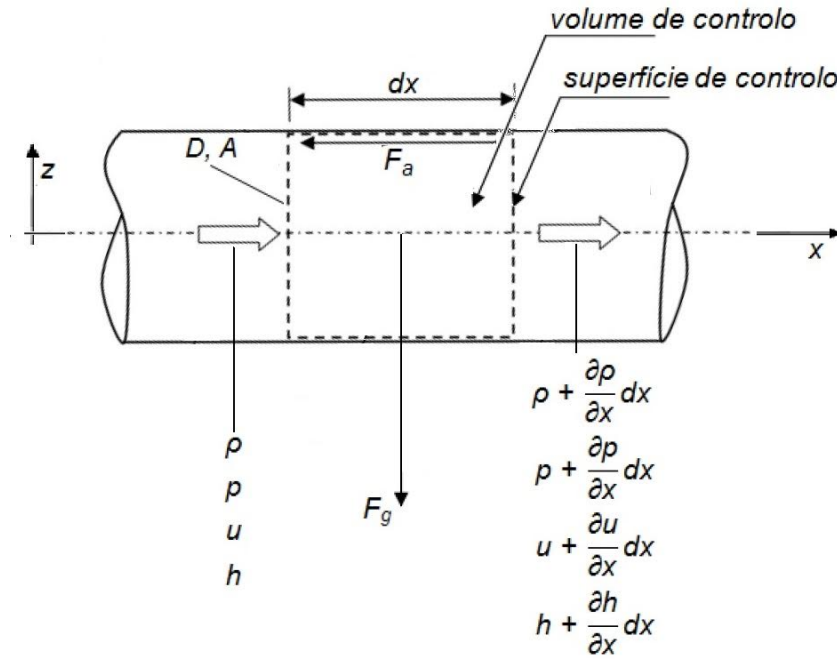


Figura 2.1: Volume de controlo de uma conduta de gás natural.

2.1.1 Conservação da massa

A forma genérica deste primeiro princípio, aplicada ao volume de controlo representado na figura 2.1 é dado por

$$\iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \iiint_V \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) dV = 0, \quad (2.1)$$

sendo ρ a massa volúmica do gás e $\mathbf{u}$ a velocidade do escoamento.

Assumindo o escoamento unidimensional ao longo de x , uma conducta fixa de comprimento L e de secção A constante ao longo de x , obtém-se

$$\int_L \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} \right) dx = 0, \quad (2.2)$$

que resulta na forma diferencial

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0. \quad (2.3)$$

2.1.2 Balanço da quantidade de movimento

Este balanço pode ser expresso através da relação:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \mathbf{u} dV + \iiint_V \rho \mathbf{u} \mathbf{u}^T dV = \sum \mathbf{F}. \quad (2.4)$$

A expressão acima não é nada mais do que a igualdade entre o somatório das forças aplicadas no volume de controlo e a variação da quantidade de movimento no volume de controlo. Essas forças podem ser classificadas de duas formas relativamente à sua origem:

- *de superfície*, onde estão incluídas a pressão hidrostática e as tensões viscosas;
- *mássicas*, que se devem a campos externos, como a gravidade, o magnetismo e o potencial eléctrico.

Para o volume de controlo das condutas de gás, têm-se em conta as seguintes forças:

- **Força de pressão.**
- **Força de atrito.**
- **Força gravítica.**

Assim, o somatório da equação (2.4) pode ser descrito de outra forma:

$$\sum \mathbf{F} = - \iiint_V \nabla p dV + \mathbf{F}_a + \iiint_V \rho_f dV. \quad (2.5)$$

p designa a pressão absoluta. Tendo em conta que a secção transversal é constante, os três termos das forças acima mencionados podem ser simplificados. O termo da força de pressão pode ser reescrito

$$\iiint_V \nabla p dV = \int_L \frac{\partial p}{\partial x} dx A. \quad (2.6)$$

Por sua vez, a força de atrito unidimensional passa a ser representada por

$$\mathbf{F}_a = - \int_L \tau_w \pi D dx = - \int_L \tau_w \pi D dx = - \int_L \frac{2f}{D} \rho u |u| dx A, \quad (2.7)$$

sendo f o coeficiente de atrito e D o diâmetro da conduta. O termo força gravítica pode ser escrito da seguinte forma:

$$\rho_f = -\rho g \sin \theta, \quad (2.8)$$

onde g é a aceleração da gravidade e θ o ângulo da conduta com a componente horizontal.

Relativamente ao primeiro membro do balanço da quantidade de movimento (equação (2.4)), pode ser descrito do próximo modo sabendo que a velocidade só tem componente na direcção x :

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \mathbf{u} dV + \iiint_V \rho \mathbf{u} \mathbf{u}^T dV = \int_L \left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} \right) dx A \quad (2.9)$$

Finalmente, substituindo as equações (2.6), (2.7), (2.8) e (2.9) em (2.4), obtem-se a forma diferencial

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{2f\rho u|u|}{D} + \rho g \sin \theta. \quad (2.10)$$

2.1.3 Conservação da energia

O princípio da conservação da energia, mais conhecido como a primeira lei da termodinâmica, dita que a variação de energia de um dado sistema é igual às trocas de energia nas formas de calor e de trabalho entre o sistema e o exterior

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho E dV + \iint_A \rho H(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) dA = \dot{Q} - \dot{W}, \quad (2.11)$$

sendo a energia total específica, E , definida como

$$E = \hat{u} + \frac{1}{2}u^2 + gz, \quad (2.12)$$

e a entalpia total específica dada por

$$H = \hat{u} + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}u^2 + gz, \quad (2.13)$$

onde $\hat{u}$ é a energia interna específica, $1/2u^2$ é a energia cinética específica e gz é a energia potencial gravítica específica. A equação (2.11) é válida para um volume de controlo fixo e indeformável.

O trabalho realizado $\dot{W}$ pode ser separado em duas vertentes,

$$\dot{W} = \dot{W}_s + \dot{W}_v, \quad (2.14)$$

onde $\dot{W}_s$ representa a taxa de tempo de trabalho transferido com o exterior através da superfície de controlo e $\dot{W}_v$ representa a taxa de tempo de trabalho executado pelas tensões viscosas

actuates na superfície de controlo.

Pode-se aplicar a expressão (2.11) no volume de controlo da figura 2.1, assumindo que não existe troca de trabalho com o exterior ($\dot{W}_s = 0$) e que o trabalho realizado pelas tensões viscosas é desprezável face aos outros termos ($\dot{W}_v = 0$). Aplicando o teorema da divergência ao termo convectivo e simplificando obtém-se

$$\int_L \left(\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u H) \right) dx A = \dot{Q}. \quad (2.15)$$

Na forma diferencial, a equação (2.15) pode ser escrita na forma

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E A) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u H A) = \dot{q}(x), \quad (2.16)$$

onde $\dot{q}(x)$ é o calor trocado na fronteira da conduta por unidade de comprimento.

Como foi referido no início do capítulo, o escoamento é assumido como isotérmico, $dT/dx = 0$ e as flutuações no tempo são lentas. Tendo em conta os argumentos supracitados, podem-se desacoplar os dois termos da equação da energia, já que são aproximadamente zero.

2.1.4 Equação de estado

Para se fechar o sistema de equações composto pelas expressões (2.3), (2.10) e (2.16) é preciso recorrer à equação de estado. As relações dos gases perfeitos são as mesmas que serão aplicadas neste estudo, pelo que

$$p = \rho Z R T. \quad (2.17)$$

A velocidade do som é dada por

$$c^2 = \gamma R T. \quad (2.18)$$

Substituindo a expressão (2.18) em (2.17), e reorganizando-a, a equação de estado dos gases perfeitos final é a seguinte:

$$\rho = \frac{\gamma p}{c^2 Z}, \quad (2.19)$$

onde γ é a razão dos calores específicos, c é a velocidade do som no gás e Z é o factor de compressibilidade.

2.2 Escoamentos transientes lentos

O passo seguinte passa por simplificar a relação do balanço da quantidade de movimento. Para que tal aconteça, é necessário proceder-se a uma avaliação na mesma ordem de grandeza dos termos da equação, determinando assim a influência de cada [5]. Considerando o segundo membro da expressão (2.10), tem-se que o contributo de cada interveniente relativamente ao do gradiente de pressão pode ser estabelecido para um caso tipo, obtendo-se as componentes percentuais em relação ao diferencial de pressão.

Se se desprezarem alguns termos da equação (2.10), está-se a caminhar para o alcance de um modelo mais simplificado. Assumindo um único sentido do escoamento (positivo) em x , os quatro termos do segundo membro representam a inércia do gás, a pressão dinâmica do gás, a força de atrito e a força da gravidade, respectivamente. Para se analisar a ordem de grandeza de cada um, deve-se integrar a expressão do balanço da quantidade de movimento [5], usando como gama de valores $x = [0, L]$. O resultado deste processo é o seguinte:

$$\begin{aligned} p(0, t) - p(L, t) &= \int_0^L \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} dx + [(\rho u^2)_{x=L} - (\rho u^2)_{x=0}] \\ &+ \int_0^L \frac{2f\rho u^2}{D} dx + \bar{\rho}g[z(L) - z(0)]. \end{aligned} \quad (2.20)$$

A contribuição de cada variável é, então, definida por

$$\delta_1 = \frac{1}{p(0, t) - p(L, t)} \int_0^L \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} dx, \quad (2.21)$$

$$\delta_2 = \frac{1}{p(0, t) - p(L, t)} ((\rho u^2)_{x=L} - (\rho u^2)_{x=0}), \quad (2.22)$$

$$\delta_3 = \frac{1}{p(0, t) - p(L, t)} \int_0^L \frac{2f\rho u^2}{D} dx, \quad (2.23)$$

$$\delta_4 = \frac{1}{p(0, t) - p(L, t)} \bar{\rho}g(z(L) - z(0)). \quad (2.24)$$

No cálculo de δ_1 , ao se aproximar o termo $\int_0^L \partial(\rho u)/\partial t dx$, fica-se com

$$\frac{1}{A} \frac{\overline{\partial(\rho u A)}}{\partial t} L \approx \frac{1}{A} \frac{\rho \Delta Q}{\Delta t} L. \quad (2.25)$$

Resta definir as condições do caso tipo para que se possa começar a resolver o contributo de

cada termo. Considera-se uma conduta com as seguintes dimensões:

- $L = 50000$ m;
- $D = 0,5$ m.

Assumindo-se um escoamento de gás natural com as respectivas propriedades mencionadas abaixo:

- $\rho_n = 0,75$ kg/m³;
- $p_n = 0,101325$ MPa;
- $T_n = 273$ K;
- $T = 288$ K;
- $c = 300$ m/s;
- $f^1 = 0,003$;
- $p(0,t) = 5$ MPa;
- $p(L,t) = 4$ MPa;
- $z(0) = 0$ m;
- $z(L) = 100$ m;
- $Q_n = 270000$ m³(n)/h.

Recorrendo à expressão dos gases perfeitos, podem-se calcular as velocidades e as densidades do escoamento através de:

$$u = \frac{T}{T_n} \frac{p_n}{p} \frac{Q_n}{A}, \quad (2.26)$$

$$\rho = \rho_n \frac{T_n}{T} \frac{p}{p_n}. \quad (2.27)$$

Em última análise, encontram-se reunidas todas as condições necessárias para se poder determinar a contribuição de cada termo. Como resultado da posterior substituição dos dados supracitados nas equações (2.21), (2.22), (2.23) e (2.24), obtêm-se as seguintes influências percentuais:

$$\delta_1 = 0,21\%, \quad (2.28)$$

$$\delta_2 = 0,04\%, \quad (2.29)$$

$$\delta_3 = 97,86\%, \quad (2.30)$$

$$\delta_4 = 1,89\%. \quad (2.31)$$

¹Este valor é obtido recorrendo a uma formulação semi-empírica (anexo A)

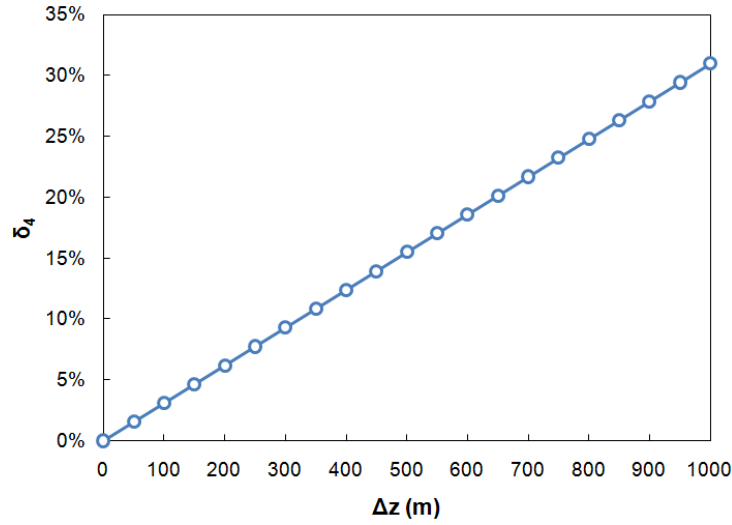


Figura 2.2: Influência da força da gravidade com a variação da altura.

Estes resultados providenciam as seguintes conclusões:

- a inércia do gás, $\partial(\rho u)/\partial t$, é pouco influente, excepto quando as condições de fronteira apresentam alterações rápidas num curto espaço de tempo. Desde que essas variações sejam graduais, também este termo poderá ser desprezado sem que exista qualquer prejuízo nos resultados.
- a pressão dinâmica do gás, $\partial(\rho u^2)/\partial x$, é o termo menos influente. Assim, pode-se desprezar esta expressão.
- a força de atrito, $2f\rho u|u|/D$, é o termo de maior contribuição;
- a força gravítica, $\rho g \sin \theta$, contribui pouco e a sua acção apenas se torna relevante quando as condutas apresentam desníveis acentuados (figura 2.2). Regra geral, as condutas são projectadas de modo a evitar grandes assimetrias, pelo que também esta expressão pode ser desprezada na formulação.

2.3 Modelação

A modelação do escoamento de gás em condutas tem de ser concebida de forma a respeitar as seguintes condições:

- variações de cotas negligenciáveis;
- alterações temporais lentas.

As expressões (2.3) e (2.10) retratam o funcionamento da pressão em função do tempo. Pegando na linha de raciocínio do subcapítulo 2.2, estas equações serão simplificadas.

2.3.1 Equação da conservação da massa simplificada

Respeitando um escoamento isotérmico, a equação de estado (2.19) pode ser introduzida no primeiro termo da equação (2.3). Inserindo a área, A , no segundo termo, rearranjando, posteriormente, a equação, tem-se que

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{c^2 Z}{\gamma A} \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} = 0, \quad (2.32)$$

onde

$$\dot{m} = \rho u A. \quad (2.33)$$

2.3.2 Equação do balanço da quantidade de movimento simplificada

A equação (2.10), após as simplificações, fica reduzida à seguinte forma:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{2f\rho|u|u}{D}. \quad (2.34)$$

Parametrizando os termos para que seja introduzido o caudal, resulta

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{2f|\dot{m}|\dot{m}}{\rho D A^2}, \quad (2.35)$$

Assumindo f e ρ como constantes, e considerando a seguinte expressão:

$$\frac{\partial (|\dot{m}|\dot{m})}{\partial x} = 2|\dot{m}| \frac{\partial \dot{m}}{\partial x}, \quad (2.36)$$

juntando a derivada da equação (2.35) em ordem a x , pode-se escrever, finalmente, a equação (2.36) da seguinte maneira:

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial x} = -\frac{\rho D A^2}{4f|\dot{m}|} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}. \quad (2.37)$$

2.3.3 Modelo matemático

Ao se combinarem as expressões (2.32) e (2.37), obtém-se

$$\frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\rho c^2 Z}{\gamma} \frac{DA}{4f|\dot{m}|} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0. \quad (2.38)$$

Introduzindo a equação de estado, (2.19), tem-se que

$$\frac{\partial p}{\partial t} - \frac{DAp}{4f|\dot{m}|} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0. \quad (2.39)$$

Esta expressão não é nada mais que a ED da modelação, parabólica no tempo e elíptica no espaço. Transformando os termos fora das derivadas, fica a seguinte relação:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}, \quad (2.40)$$

onde

$$\alpha = \frac{DAp}{4f|\dot{m}|}. \quad (2.41)$$

O caudal mássico, $\dot{m}$, calcula-se a partir da equação (2.35). Utilizando a equação (2.19) em (2.35) resulta

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{2fc^2Z|\dot{m}|\dot{m}}{\gamma pDA^2}, \quad (2.42)$$

manipulando, fica-se com

$$\frac{\partial p^2}{\partial x} = -\frac{4fc^2Z|\dot{m}|\dot{m}}{\gamma DA^2}. \quad (2.43)$$

Integrando a expressão para $x \in [0, L]$, obtém-se

$$p_L^2 - p_0^2 = \frac{4fc^2Z\dot{m}^2}{\gamma DA^2}L, \quad (2.44)$$

sendo que o caudal mássico foi assumido como constante no intervalo de integração. Rearranjando, uma vez mais, pode-se obter a expressão final que permite calcular $|\dot{m}|$:

$$\dot{m} = \sigma \sqrt{\frac{\gamma DA^2}{4fc^2ZL} |p_L^2 - p_0^2|}, \quad (2.45)$$

com

$$\sigma = \text{sign}(p_L^2 - p_0^2). \quad (2.46)$$

2.4 Métodos numéricos

De forma a se obter uma solução numérica para a equação (2.40), recorreu-se a algumas propriedades de um dos métodos mais utilizados em simulação de escoamentos unidimensionais:

- **Elementos finitos.**

Em redes complexas de gás natural, quando os escoamentos em regime transiente são computacionalmente analisados, os valores de pressão são obtidos em cada ponto discretizado juntamente a um elemento, como também em cada nó, actuando este como união dos troços,

assumindo como conhecidos os valores do caudal e da pressão em certos nós. Para estes se simularem, respeitam-se dois princípios físicos:

- independentemente do elemento que intersecte um determinado nó, a pressão nesse nó deve ser sempre a mesma;
- a primeira lei de Kirchhoff (lei dos nós), que assume a conservação da massa em cada nó.

2.4.1 Método dos elementos finitos (MEF)

O método dos elementos finitos possibilita resolver ED, parciais ou ordinárias, obtendo dessa forma soluções aproximadas. É muito utilizado em engenharia, permitindo poupar bastantes recursos, nomeadamente tempo. Existem várias metodologias que podem ser utilizadas: O método de Ritz, de Galerkin, de Galerkin descontínuo, dos mínimos quadrados, da colocação, entre outros. Na sua generalidade, existem certos processos que são comuns à grande maioria dos métodos.

Considere-se a gama de valores total do problema. Será necessário separar esse domínio num número finito de subcamadas, chamadas de elementos finitos, onde será aplicado um determinado método variacional. Ora, a cada elemento estará associada uma função polinomial que dará origem a uma equação algébrica e que, também ela, será assemblada às restantes formando, assim, um sistema de equações. Este sistema é que vai proporcionar a obtenção de uma solução aproximada do problema.

A formulação matemática descrita neste documento foi desenvolvida por Gato e Henriques [28], no qual é considerado um domínio, Ω , e uma discretização espacial, onde é apresentada uma malha composta por um conjunto de subdomínios, $\Omega_e = [x_e, x_{e+1}]$, $e = 1, \dots, n$, de comprimento $h_e = x_{e+1} - x_e$, $e = 1, \dots, n$, e pelos respectivos nós, $e = 1, 2, \dots, n$. Estes conjunto de intervenientes resultantes da separação do domínio é conhecido como a malha dos elementos finitos (figura 2.3).

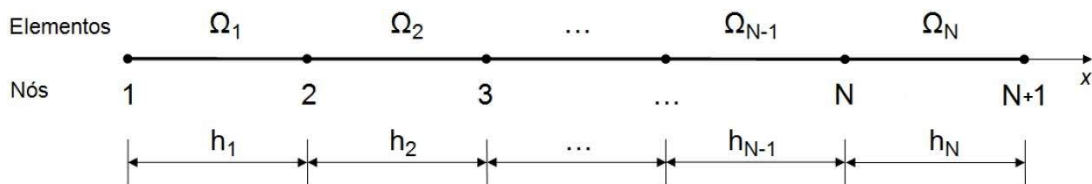


Figura 2.3: Elementos e nós num domínio hipotético

2.4.1.1 Implementação do MEF

Ao se introduzir a área², A , na equação (2.40), tem-se que

$$A \frac{\partial p}{\partial t} - \alpha A \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0. \quad (2.47)$$

A formulação fraca aplicada à equação supracitada fica

$$A_e \int_{\Omega_e} \frac{\partial p}{\partial t} \phi \, dx - \alpha_e A_e \int_{\Omega_e} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} \, dx - \left[\alpha_e A_e \frac{\partial p}{\partial x} \phi \right]_{x_e}^{x_{e+1}} = 0. \quad (2.48)$$

Multiplicou-se a relação 2.47 por uma função de teste, ϕ , e integrou-se por partes. O terceiro termo da expressão (2.48) pode ser relacionado com o caudal mássico através de

$$\left[\alpha_e A_e \frac{\partial p}{\partial x} \phi \right]_{x_e}^{x_{e+1}} = \left[-\beta \dot{m} \phi \right]_{x_e}^{x_{e+1}}, \quad (2.49)$$

sabendo que o primeiro termo pode ser relacionado da seguinte maneira:

$$\alpha A \frac{\partial p}{\partial x} = -\beta \dot{m}, \quad (2.50)$$

onde

$$\beta = \frac{c^2 Z}{2\gamma}. \quad (2.51)$$

Utilizando funções de forma [29] para descrever a pressão,

$$p(x, t) = \sum_{j=1}^k \phi_j(x) p_j(t), \quad (2.52)$$

Substituindo-as nas funções de teste, pode-se escrever a equação (2.48) da seguinte forma:

$$A_e \sum_{j=1}^k \int_{\Omega_e} \phi_i \phi_j \frac{\partial p_j}{\partial t} \, dx + \alpha_e A_e \sum_{j=1}^k \int_{\Omega_e} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \frac{\partial \phi_j}{\partial x} p_j \, dx + [\beta \dot{m} \phi_i]_{x_e}^{x_{e+1}} = 0, \quad (2.53)$$

onde os somatórios foram retirados do interior do integral. Generalizando, tem-se que

$$\sum_{j=1}^k C_{ij}^e \frac{\partial p_j}{\partial t} + \alpha_e \sum_{j=1}^k K_{ij}^e p_j + [\beta \dot{m} \phi_i]_{x_e}^{x_{e+1}} = 0, \quad (2.54)$$

²Adiciona-se a área da secção à expressão para garantir conservação do caudal nos nós (anexo B). Nesta modelação, a articulação de condutas de secção transversal diferente acontece num único nó.

em que C_{ij}^e é a entrada da matriz de massa e K_{ij}^e é a entrada da matriz de rigidez:

$$C_{ij}^e = A_e \int_{\Omega_e} \phi_i \phi_j \, dx, \quad (2.55)$$

$$K_{ij}^e = A_e \int_{\Omega_e} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \frac{\partial \phi_j}{\partial x} \, dx. \quad (2.56)$$

Considerando elementos lineares de comprimento h_e (figura 2.4), as funções de forma, ϕ_1 e ϕ_2 , e as suas derivadas são dadas por

$$\phi_1 = 1 - \frac{x}{h_e}, \quad (2.57)$$

$$\phi_2 = \frac{x}{h_e}, \quad (2.58)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x} = -\frac{1}{h_e}, \quad (2.59)$$

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial x} = \frac{1}{h_e}. \quad (2.60)$$

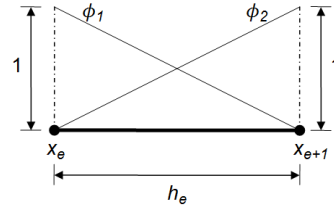


Figura 2.4: Funções base lineares

Desta feita, podem-se determinar as matrizes de massa e de rigidez da seguinte maneira:

$$[C^e] = \frac{A_e h_e}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1/2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.61)$$

$$[K^e] = \frac{A_e}{h_e} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.62)$$

Recorrendo às aproximações de segunda ordem de Crank-Nicholson, implícitas no tempo, a equação (2.54), fica

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^2 C_{ij}^e (p_j^{n+1} - p_j^n) = & -\frac{\Delta t}{2} \alpha_e^n \sum_{j=1}^2 K_{ij}^e (p_j^{n+1} - p_j^n + p_j^n + p_j^n) - \\ & -\frac{\Delta t}{2} \left[([\beta \dot{m} \phi_i]_{x_e}^{x_{e+1}})^{n+1} + ([\beta \dot{m} \phi_i]_{x_e}^{x_{e+1}})^n \right]. \end{aligned} \quad (2.63)$$

Assumindo $\Delta p_j^{n+1} = p_j^{n+1} - p_j^n$, obtém-se

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^2 \left(C_{ij}^e + \frac{\Delta t}{2} \alpha_e^n K_{ij}^e \right) \Delta p_j^{n+1} = & -\Delta t \alpha_e^n \sum_{j=1}^2 K_{ij}^e p_j^n - \\ & -\frac{\Delta t}{2} \left[([\beta \dot{m} \phi_i]_{x_e}^{x_{e+1}})^{n+1} + ([\beta \dot{m} \phi_i]_{x_e}^{x_{e+1}})^n \right]. \end{aligned} \quad (2.64)$$

Na modelação será incluído um grupo de equações do tipo (2.64), que geram um sistema de

equações. A forma matricial deste sistema é a seguinte:

$$\mathbf{A} \Delta \mathbf{p}^{n+1} = \mathbf{z}. \quad (2.65)$$

A montagem da matriz $\mathbf{A}$ segue os procedimentos descritos por Becker *et al.* (figura 2.5).

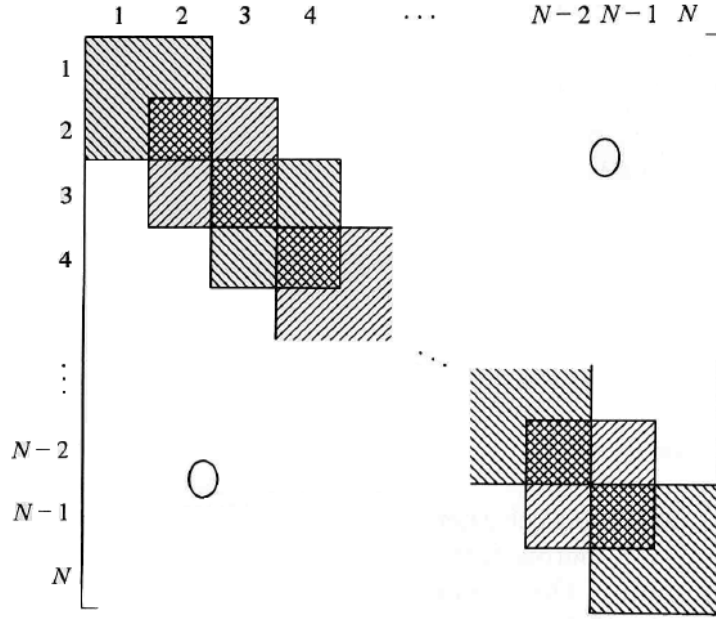


Figura 2.5: Assemblagem da matriz $\mathbf{A}$ (adaptado de [29]).

2.4.1.2 Condições de fronteira

Para que as variáveis para a simulação de um escoamento numa conduta simples ou numa rede complexa estejam todas reunidos, resta especificar as condições de fronteira. Para se inserir o caudal nas extremidades dos gasodutos, usa-se o seguinte termo da equação (2.64):

$$\frac{\Delta t}{2} \left[([\beta \dot{m} \phi_i]_{x_e}^{x_{e+1}})^{n+1} + ([\beta \dot{m} \phi_i]_{x_e}^{x_{e+1}})^n \right],$$

onde as partes representadas pelos índices $n+1$ e n dizem respeito, respectivamente, ao caudal que se pretende descobrir e ao do instante de tempo anterior.

Para se estabelecer a pressão num determinado nó da rede é necessário atribuir um valor extremamente alto à entrada da linha da matriz $\mathbf{A}$, que está associada ao ponto onde se planeia inserir a pressão; essa entrada é diagonal. O troço do vector $\mathbf{z}$ que pertença à mesma linha é definido pelo produto do próprio vector com o termo $\Delta p^{n+1,*} = p_i^{n+1,*} - p_i^n$, onde $p_i^{n+1,*}$ e p_i^n

estão associados aos valores da pressão nos instantes $n + 1$ e n , pela mesma ordem. Assim, tem-se

$$\begin{bmatrix} \dots & 10^{30}\delta_{ii} & \dots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta p_i^{n+1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 10^{30}\Delta p^{n+1,*} \end{Bmatrix}. \quad (2.66)$$

δ_{ii} simboliza o delta de Kronecker.

2.5 Implementação computacional

De forma a implementar o método dos elementos finitos referenciado na secção anterior, recorreu-se a um código concebido por Gato e Henriques [28], que recorreu à linguagem de programação Python, onde foi alvo de melhorias, tais como a alteração das funções usadas para se criarem as sub-rotinas de gravação do diagrama da cadeia de gás usada e de dados correspondentes à mesma (pressão, consumos, caudais, etc.), ou a optimização da assemblagem das matrizes das funções lineares.

Abaixo, encontram-se algumas instruções acerca dos procedimentos a adoptar.

2.5.1 Algoritmo

A enumeração apresentada a seguir é apenas um resumo dos passos utilizados na modelação, no entanto faculta uma boa ideia das fases envolvidas no processo, que se encontram ordenadas:

1. Estabelecimento do tempo, e do respectivo passo, de simulação.
2. Introdução dos dados do problema: características dos gasodutos (diâmetro, comprimento, repartições), condições de fronteira (pressão, caudal) e condição inicial de pressão nos nós.
3. Divisão das condutas em elementos de reduzido alongamento, h_e , possibilitando assim uma discretização espacial precisa.
4. Determinação dos coeficientes independentes das matrizes e dos vectores que constituem o sistema de equações.
5. Construção do sistema de equações e das equações relativas às condições condições de fronteira, onde o valor é actualizado a cada hora.
6. Resolução do sistema de equações.

7. Apresentação dos resultados gráficos (ou ficheiros). Repetem-se as fases quatro a sete até ser terminado o tempo de simulação.

2.5.2 Resolução do sistema algébrico

As redes de gás complexas causam um elevado número de equações do tipo (2.65), que necessitam de ser resolvidas para cada elemento, h_e , a cada espaço de tempo, Δt . Só assim é possível obterem-se os valores das pressões e, posteriormente, dos caudais. Como já foi referido anteriormente, os sistemas algébricos podem ser configurados em matrizes e vectores:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (2.67)$$

onde $\mathbf{A}$, $\mathbf{x}$ e $\mathbf{b}$ representam, respectivamente, a matriz dos coeficientes, o vector das incógnitas e o vector dos termos independentes.

As matrizes obtidas são conhecidas como matrizes esparsas, i.e., são maioritariamente constituídas por zeros. Caso sejam utilizados métodos convencionais para armazenar os coeficientes destas, tratar-se-á, seguramente, de um processo mais moroso. Ao serem salvos apenas os valores não nulos, aumenta-se consideravelmente a eficiência computacional.

Os métodos de resolução de matrizes esparsas podem-se dividir em duas classes distintas [30]:

- **métodos directos**, onde a solução resulta de um leque finito de acções aritméticas. A factorização pode ser reutilizada noutras operações do sistema com parâmetros independentes diferentes. O método de resolução usado no código computacional é o directo.
- **métodos iterativos**, em que após uma elevada série de operações aritméticas se obtém a solução, i.e., partindo de uma estimativa inicial, x^0 , é gerado um leque de soluções, $x^1, x^2, \dots, x^k$ que convergem para a solução exacta do problema. A matriz $\mathbf{A}$ não sofre qualquer alteração durante o processo.

2.5.2.1 Coeficientes das matrizes esparsas

Para que a simulação de cadeias de condutas de gás seja melhorada, convém recorrer a uma plataforma de armazenamento de matrizes esparsas existente: *esquema coordenado*, *colecção de vectores esparsos* ou *listas ligadas* [31]. Relativamente aos seus coeficientes, estes

são armazenados como vectores.

Os esquemas caracterizam-se por necessitarem de dois tipos de armazenamento:

- uma parte primária, cujo vector de números reais que a forma (podem existir mais) contém todos os elementos não nulos da matriz esparsa;
- uma parte secundária, que é constituída por, no mínimo, um vector de números inteiros que retêm a informação indispensável para que os elementos da parte primária sejam localizados. Não é preciso guardar os valores dos coeficientes das matrizes por ordem da linha e/coluna a eles associadas.

O método a que a linguagem usada nesta dissertação recorre são as listas ligadas.

2.5.2.2 Factorização LU

O algoritmo deste código tem como alicerce o método de factorização, **LU**, com selecção de pivot parcial [32]. Este apresenta a seguinte forma algébrica [31]:

$$\mathbf{PA} = \mathbf{LU}, \quad (2.68)$$

onde **P**, **L** e **U** são, respectivamente, as matrizes de permutação por linha, triangular inferior e triangular superior.

Capítulo 3

Simulações

Tendo em conta as actualizações que a rede sofreu nestes últimos anos e ainda aquelas que se pretendem realizar, foram simulados alguns casos. Visto que no ano em que o código foi construído o anel ainda não havia sido unido, *i.e.*, as condutas entre a Guarda a Mangualde ainda não haviam sido ligadas, o primeiro caso é obviamente o estado actual da RNTGN. Relativamente ao modelo adaptado [33], apenas se procederam a optimizações de desempenho do código, alterações estruturais da rede e a variações das condições de fronteira de forma a se poder avaliar alguns casos mais pertinentes.

A simulação seguinte teve em consideração a proposta de construção do lote 9, lote esse que ligará Celorico da Beira a Vale de Frades, no concelho do Vimioso (junto à fronteira espanhola). Segundo o último relatório público disponibilizado pela ERSE, prevê-se que este lote entre em funcionamento em 2022.

O terceiro caso apresentado tem em conta a terminação do contracto de fornecimento de gás entre Badajoz e Campo Maior, onde a rede espanhola desempenha o papel de fornecedor. Tentou-se, então, procurar uma solução para um eventual fecho da válvula em Campo Maior.

As dimensões da rede e de cada gasoduto foram obtidas recorrendo às figuras C.2, C.3 e C.4 do anexo C. Na simulação discretizou-se cada troço em porções de 1000 metros. Considere-se uma conduita de 3550 metros. Esta será separada em três elementos distintos. As figuras C.5, C.6 e C.7 correspondem, respectivamente, à rede detalhada de cada um dos casos analisados neste capítulo.

3.1 RNTGN em 2018

A rede nacional de transporte de gás natural abrange uma grande área, que vai desde Sines a Valença do Minho, e ainda se estende para o interior, chegando a Campo Maior e Guarda. Relativamente à rede projectada por Gato [33], realizaram-se algumas alterações: fecho do anel entre a Guarda e Mangualde e adição de algumas GRMS (estações de redução e medição de gás natural) em toda a rede. Isto proporciona um total de 93 nós e 93 elementos no código.

Os gráficos de pressão que serão apresentados mais adiante correspondem aos pontos extremos da rede e, também, àqueles de maior interesse, cujos valores são mais reduzidos (os requisitos da rede impõem que os valores de pressão sejam sempre superiores a 40 bar e inferiores a 80 bar). Os acordos com a rede espanhola têm associados uma pressão de fornecimento de 45 bar, pelo que os valores mínimos exigidos em cada simulação sejam sempre superiores a esse valor. Tendo em conta o argumento anterior, seleccionou-se o seguinte conjunto de pontos para serem apresentados nesta dissertação:

- o terminal de Sines, Valença do Minho e Campo Maior que, juntos, delimitam as extremidades da rede;
- as centrais termoeléctricas do Ribatejo e da Tapada do Outeiro, que são os dois pontos de maior consumo na rede;
- Viana do Castelo, cujos gasodutos nessa zona apresentam os menores valores de pressão de toda a rede.

Os consumos das novas GRMS foram calculados a partir da razão entre a população do município em que estão inseridas e o consumo médio horário, nas regiões próximas, que serão aquelas que apresentarão um comportamento mais idêntico. Traçou-se um gráfico e calculou-se a equação da linha de tendência de consumo. Essa relação permitiu calcular o consumo médio esperado da nova estação e, face a esse valor utilizar uma relação de consumo com outra GRMS e, dessa forma, a respectiva distribuição de pressão esperada.

Os dados utilizados nesta dissertação tiveram origem numa semana real de trabalho da rede nacional, todavia não estão actualizados, pelo que poderão não corresponder aos consumos de hoje em dia. Utilizou-se um período de simulação, em horas, correspondente a uma semana (168 horas) e um passo de 600 segundos. Os dois pontos de fornecimento, Sines (com imposição da pressão) e Campo Maior (com imposição do caudal mássico), juntamente com os consumos à saída dos restantes nós do sistema foram as condições de fronteira aplicadas.

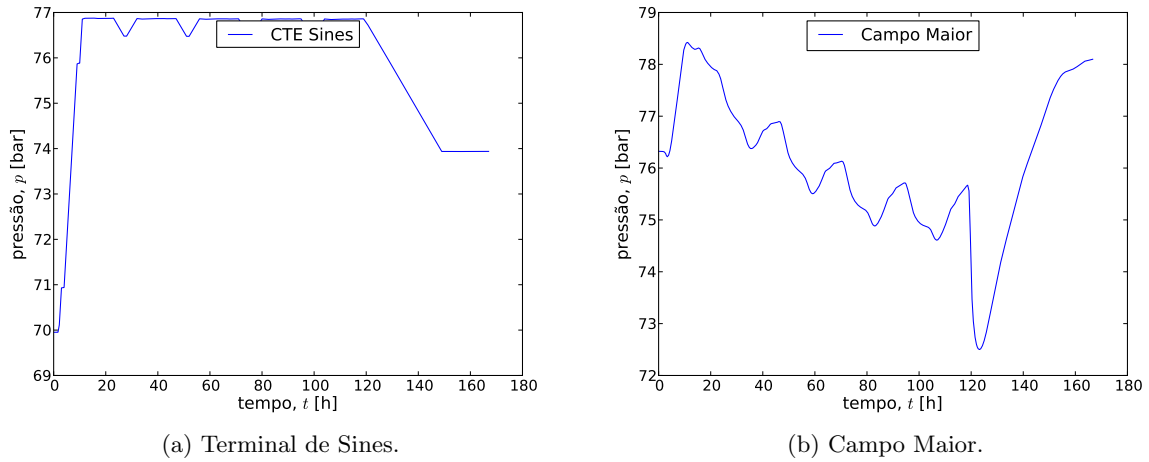


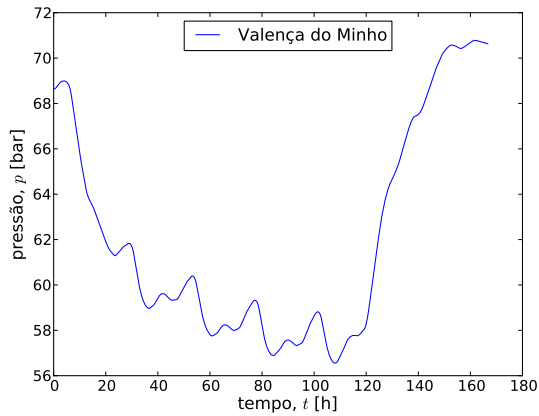
Figura 3.1: Flutuação da pressão ao longo de uma semana de trabalho da rede na configuração de hoje em dia (figuras (a) e (b)).

Recorrendo aos gráficos da figura 3.1, percebe-se à primeira instância, que à excepção do terminal de Sines, a pressão apresenta a mesma tendência em todos os pontos, *i.e.*, na segunda-feira, nas primeiras horas, tem-se um dos picos de pressão, que, posteriormente, vai descer progressivamente até sexta-feira às 13 horas (hora 108 na simulação), seguindo-se um aumento acentuado durante o fim-de-semana. A figura 3.1b é uma das excepções que é justificada pelo aumento do *linepack*, devido à diminuição do consumo nas restantes GRMS e centrais termoeléctricas. Uma vez reduzido o caudal de gás natural a entrar em Campo Maior, às 2 horas da manhã de sábado, os valores de pressão de todos os pontos adquirem um comportamento muito semelhante (figura 3.2b).

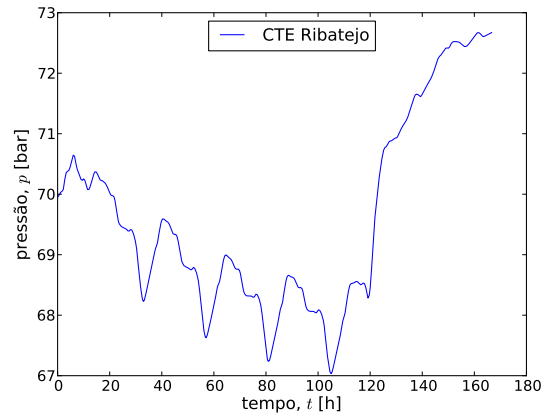
É importante realçar que no simulador, o 0 faz parte da contagem, por isso em vez das 168 horas semanais, apenas foram introduzidas 167 (para tornar a contagem correcta). Outro ponto importante de realçar é o consumo industrial, que vai definir as grandes flutuações das linhas de pressão, visto ser consideravelmente superior ao doméstico. O facto das centrais produzem substancialmente mais energia durante os dias úteis explica a diminuição diária progressiva do consumo médio durante essa altura, bem como no fim-de-semana existir uma recuperação da pressão nas condutas provocada pelo aumento do *linepack*. Essa subida vai atenuando no final da semana em busca de uma pressão de estabilidade.

O comportamento alternado diário da pressão (a cada 24 horas) apresentado em todos os gráficos, excepto no de Sines, onde esta foi imposta, é justificado pela diminuição da massa de

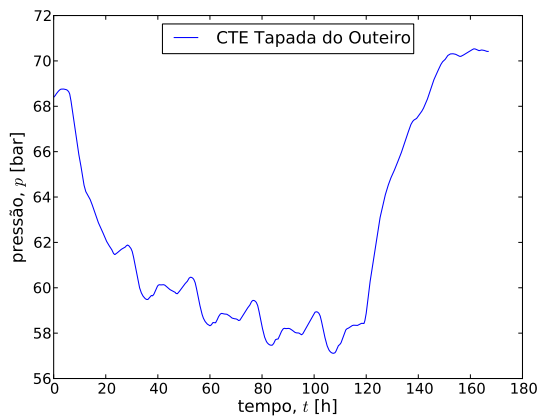
caudal acumulada na rede face ao consumo intenso. Durante a noite, o gás volta a ser acumulado na rede por se tratar de uma altura de consumos consideravelmente inferiores (muitas empresas encerram).



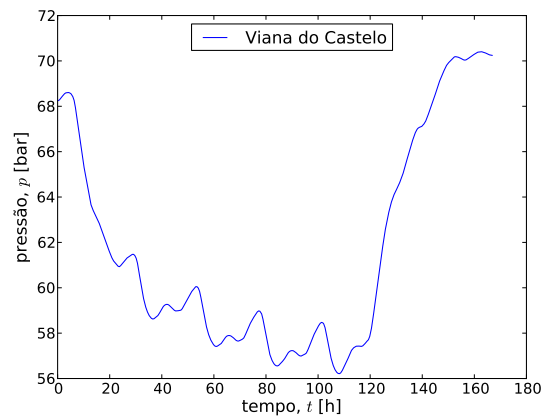
(c) Valença do Minho.



(d) Central termoeléctrica do Ribatejo.



(e) Central termoeléctrica da Tapada do Outeiro.



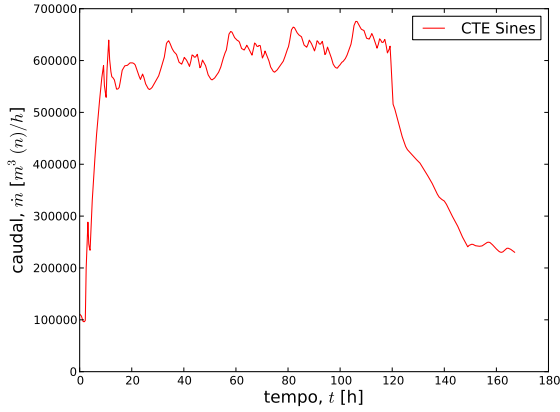
(f) Viana do Castelo.

Figura 3.1: Flutuação da pressão ao longo de uma semana de trabalho da rede na configuração de hoje em dia (figuras (c) a (f)).

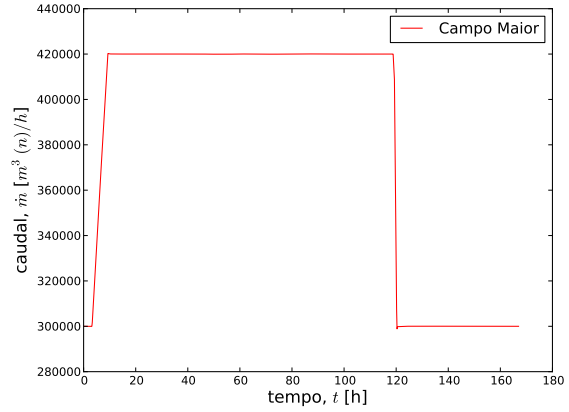
Do ponto de vista do cumprimento dos requisitos da rede, é perfeitamente visível que todos os valores de pressão dos gráficos apresentados se encontram dentro das normas. A figura 3.1b é aquela em que é atingido o maior valor de pressão, aproximadamente 78,5 bar, e a figura 3.1a é aquela que tem uma média superior, sensivelmente 76,3 bar. Estas situações são facilmente explicadas pelo facto de serem as duas fontes principais de gás natural na rede.

Relativamente aos valores mínimos, tal como foi referido anteriormente, a figura 3.1f é aquela que apresenta os valores mínimos em toda a rede, cerca de 56,7 bar. A distância entre Viana do Castelo e os nós de entrada de gás na rede (CTE Sines e Campo Maior) é o principal factor

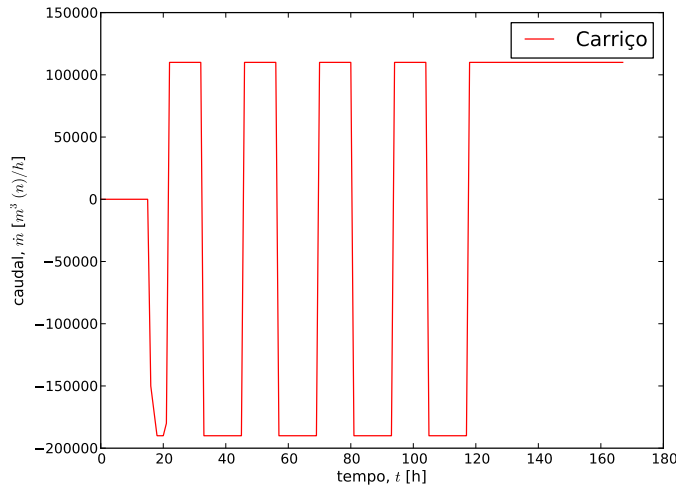
a ter em conta, no entanto os consumos *per capita* acabam por ser o atributo diferenciador (de outra forma seria Valença do Minho a ter os menores valores de pressão).



(a) Terminal de Sines.



(b) Campo Maior.



(c) Carrigo.

Figura 3.2: Flutuação do caudal mássico ao longo de uma semana de trabalho da rede na configuração de hoje em dia.

Nas figuras 3.2a, 3.2b e 3.2c observa-se a distribuição de caudal mássico por hora ao longo de toda a semana. O terminal de Sines é o principal fornecedor de toda a rede, representando, durante os dias úteis, mais de 50% de toda a rede. A evolução do seu caudal apresenta muitas flutuações face à necessidade de cumprir os requisitos de pressão impostos nesse nó. Uma vez mais, pode-se confirmar a forte diminuição de consumos no fim-de-semana olhando para a quebra de caudal apresentada no final do dia de sexta-feira. Campo Maior é o outro grande fornecedor da rede; juntamente com Sines abastecem praticamente todo o sistema. O Carrigo é um reservatório subterrâneo, cuja principal função é colmatar eventuais deficiências na rede, daí

que apresente este comportamento pulsado. Relativamente às capacidades máximas de injeção na rede de cada um dos três pontos, tem-se:

- **Sines:** 1,35 milhões de $\text{m}^3(\text{n})/\text{h}$, onde se está a utilizar 50% do seu total;
- **Campo Maior:** 513000 $\text{m}^3(\text{n})/\text{h}$, que representa cerca de 81,9% da sua capacidade;
- **Carrigo:** 300000 $\text{m}^3(\text{n})/\text{h}$, cujo peso é aproximadamente 33,3% do seu máximo.

Pelos gráficos de caudal, pode-se afirmar que este dimensionamento da rede é suficiente face às necessidades aqui representadas e que se está a perder bastante potencial tendo em conta as capacidades máximas de injeção na rede. Isto pode ser justificado pelas alterações que esta sofreu nos últimos 8 anos: foram implementadas duas cavernas subterrâneas no Carrigo e ainda um reservatório em Sines com uma capacidade de 150000 $\text{m}^3(\text{n})$ de GNL.

Na figura C.5 está apresentado um diagrama detalhado de toda a rede onde poderão ser comprovadas todas as conclusões tiradas neste capítulo. Estão apresentados todos os nós e elementos da rede, bem como as suas interligações e ainda as características das condutas (extensão e diâmetro). Para além disso, pode-se ver o caudal mássico a atravessar cada gasoduto e a respectiva pressão na pior situação de toda a semana (sexta-feira, às 13 horas), onde são registados os valores mais baixos de pressão em toda a rede.

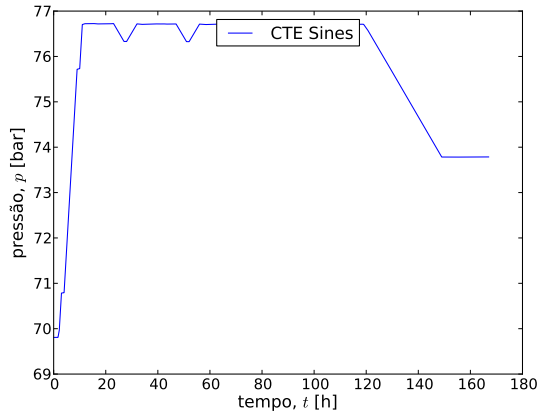
3.2 Adição do lote 9 à rede

Esta simulação teve em conta a proposta de construção de um lote que faça a ligação entre Celorico da Beira e Vale de Frades, no Vimioso. É uma proposta que se encontra em fase de aceitação e que ainda só não foi avante por causa de questões ambientais. Estima-se que em 2022 este troço, de 158,11 km de extensão (figura C.4), entre em funcionamento.

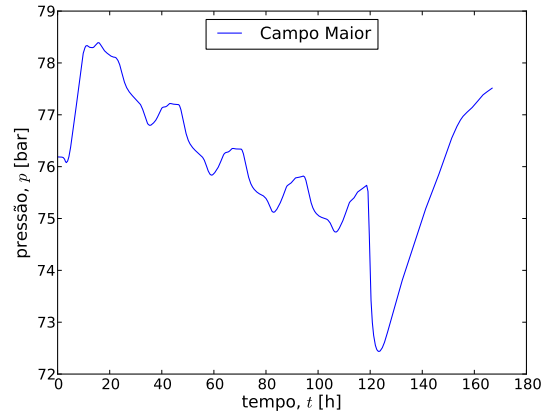
Prevê-se que esta nova adição seja constituída por uma única GRMS, pelo que a nova configuração terá apenas mais um nó e um elemento, perfazendo assim 94 de cada. Os restantes requisitos e condições impostas na simulação anterior manter-se-ão neste caso hipotético.

Como se pode observar nos gráficos acima representados, surgiram dois novos pontos de interesse: Vale de Frades, novo ponto de comunicação com a rede espanhola, e Perafita, que apresenta os valores mínimos da rede a par de Viana do Castelo. Ainda que o troço do lote 9 tenha uma extensão muito elevada, o consumo muito reduzido quando comparado com os restantes lotes, faz com que o impacto na rede seja praticamente nulo. De facto, as poucas

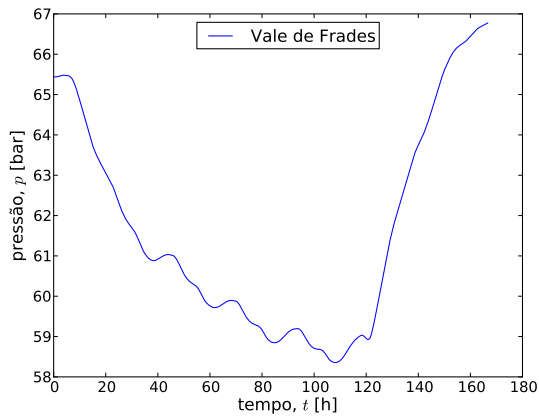
diferenças existentes, deparam-se nas estações mais afastadas (Valença do Minho, Viana do Castelo e Perafita), onde se nota um ligeiro aumento da pressão. Para o pior caso, em Viana do Castelo, a diferença é de 0,5 bar.



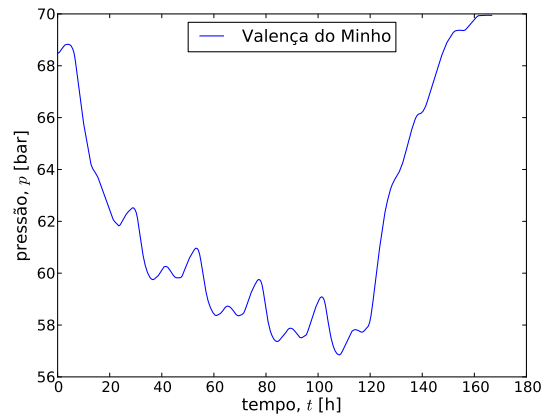
(a) Terminal de Sines.



(b) Campo Maior.



(c) Vale de Frades.

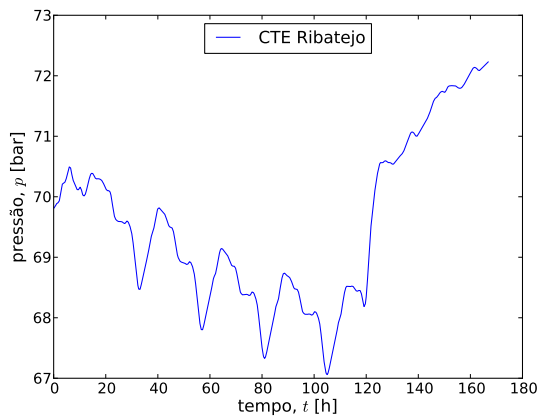


(d) Valença do Minho.

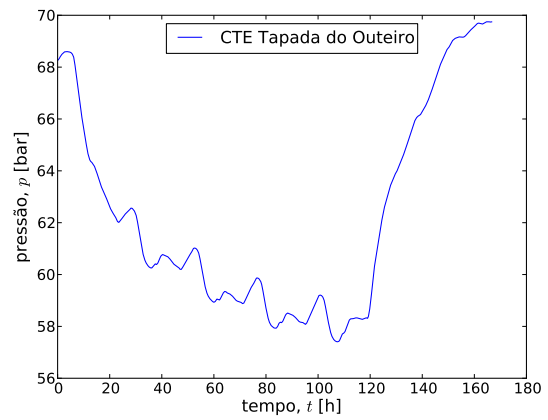
Figura 3.3: Flutuação da pressão ao longo de uma semana de trabalho da rede supondo a adição do lote 9 entre Celorico da Beira e Vale de Frades (figuras (a) a (d)).

Um parâmetro bastante relevante em relação aos gráficos é a localização geográfica das GRMS. Na primeira simulação não foi tão perceptível, devido ao número reduzido de gráficos e ao distanciamento entre eles. A evolução da pressão tem como principais influenciadores o terminal de Sines e Campo Maior (são os fornecedores). Nas regiões mais próximas de Sines e, também, naquelas menos afectadas pelo caudal proveniente de Campo Maior, nota-se uma tendência mais dentada da pressão, apresentando menores variações entre os picos máximo e mínimo, no entanto mais bruscas (figura 3.3e). Quando se analisa a outra extremidade da rede, mais propriamente, o litoral norte, denota-se a flutuação mais suave dos valores de pressão, ao mesmo tempo que as diferenças entre os valores máximo e mínimo dobra (é justificado pela

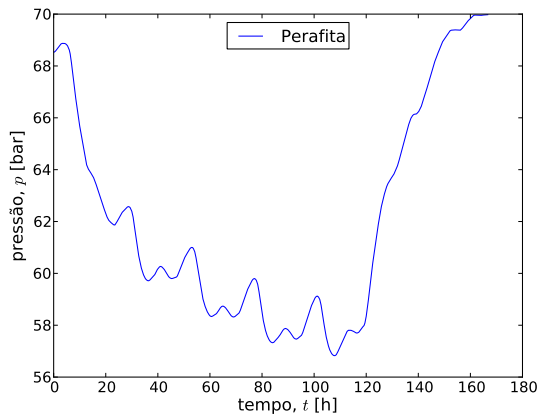
distância à fonte). De facto, existem muitas semelhanças nas figuras 3.3d, 3.3f, 3.3g e 3.3h.



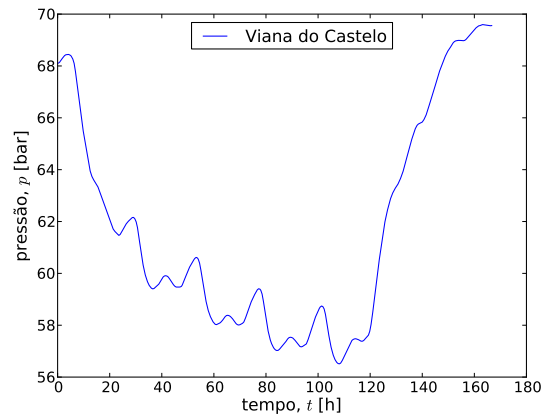
(e) Central termoelétrica do Ribatejo.



(f) Central termoelétrica da Tapada do Outeiro.



(g) Perafita.



(h) Viana do Castelo.

Figura 3.3: Flutuação da pressão ao longo de uma semana de trabalho da rede supondo a adição do lote 9 entre Celorico da Beira e Vale de Frades (figuras (e) a (h)).

Relativamente aos fornecedores na rede (Sines, Campo Maior e Carriço), nos gráficos de caudal mássico em função do tempo, tal como nos de pressão, observam-se os mesmos comportamentos e facilmente se tiram as mesmas conclusões. Sabendo que o abastecimento via Carriço e Campo Maior são condições impostas e que, por conseguinte, apresentarão sempre os mesmos valores de caudal em todas as simulações, as figuras 3.2b e 3.2c servem para descrever as curvas dos casos seguintes. Assim sendo, tem-se que o termo de comparação será o terminal de Sines. Analisando a figura 3.4, percebe-se que está tudo em conformidade com o que se acabou de dizer, o que era previsível, tendo em conta que foi referido anteriormente que o consumo em Vale de Frades é muito reduzido.

Pode-se, finalmente, dizer com toda a certeza que este dimensionamento da rede suprime

os requisitos da rede com toda a segurança e que, novamente, não se está a recorrer a todo o potencial, visto que no final da semana, atinge um pico de cerca de $650000 \text{ m}^3(\text{n})$ de gás natural fornecido, onde se está a utilizar quase 50% da sua capacidade máxima.

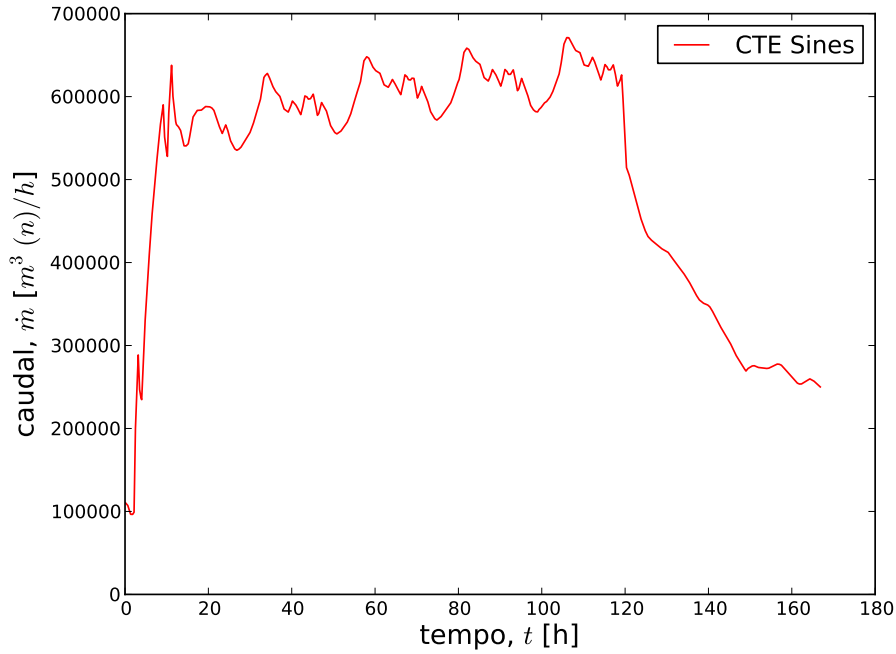


Figura 3.4: Flutuação do caudal mássico ao longo de uma semana de trabalho da rede na configuração de hoje em dia, no terminal de Sines.

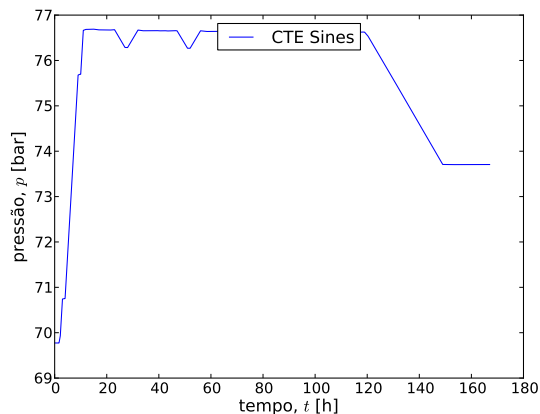
Na figura C.6 está representado um diagrama detalhado deste caso hipotético que justifica tudo o que acabou de ser dito. Em todos os casos de estudo será apresentada uma figura deste tipo. Nesta, a hora em que são registados os valores mais baixos de pressão em toda a rede é, também, às 13 horas de sexta-feira.

3.3 Interrupção da ligação de Badajoz a Campo Maior

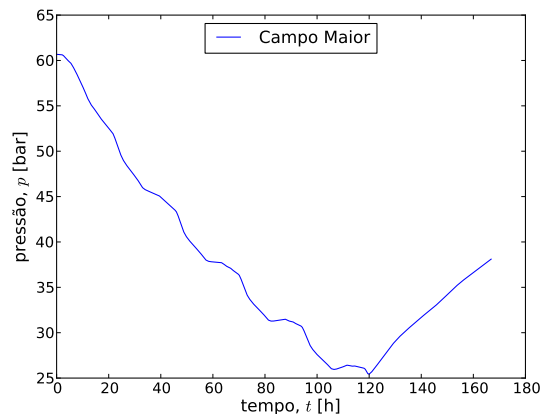
Nesta hipótese avaliou-se a possibilidade do porto de Sines conseguir fornecer toda a rede. Sabendo que o contracto *take-or-pay* da ligação entre Campo Maior e Badajoz está a terminar, é necessário decidir se compensa continuar com o mesmo contracto ou se existem outras alternativas mais indicadas. Um contracto *take-or-pay* consiste num aluguer de serviços a um fornecedor; caso o cliente não esteja disposto a receber o produto, tem de pagar um valor inferior ao aluguer para não o receber, isto até ao final do contracto.

Independentemente de se vir a renegociar esse acordo, existe sempre a possibilidade de vir a

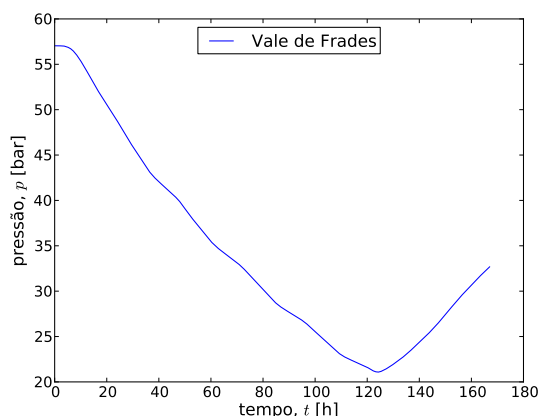
ocorrer um acidente numa das condutas de acesso na rede espanhola, ou mesmo, algum caso de manutenção que exija o seu encerramento por um período determinado.



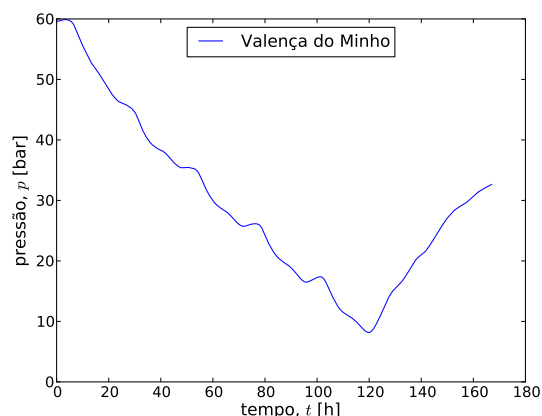
(a) Terminal de Sines.



(b) Campo Maior.



(c) Vale de Frades.



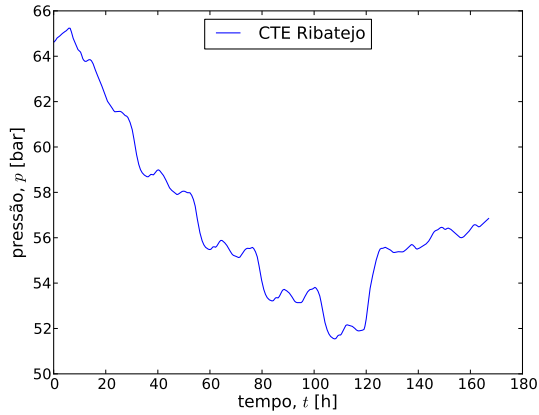
(d) Valença do Minho.

Figura 3.5: Flutuação da pressão ao longo de uma semana de trabalho da rede supondo a adição do lote 9 entre Celorico da Beira e Vale de Frades e o fecho da válvula em Campo Maior (figuras (a) a (d)).

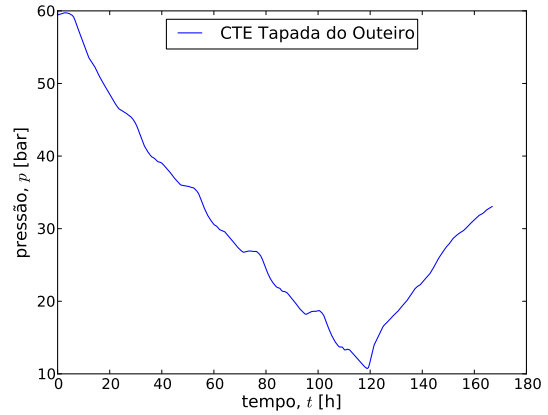
A estrutura da rede sofreu uma pequena alteração em relação à anterior: foi removida a condição de fronteira de caudal em Campo Maior (deixou de fornecer a rede) e, por conseguinte, o respectivo elemento de ligação ao consumo nessa GRMS. Esta alteração reduz para um total de 92 nós e 92 elementos na rede.

Relativamente aos pontos de interesse, *i.e.*, às estações estudadas nesta hipótese, voltarão a ser analisados os mesmos: terminal de Sines, Campo Maior, Valença do Minho e Vale de Frades, por delimitarem as extremidades da rede; centrais do Ribatejo e da Tapada do Outeiro, por serem os dois pontos com um consumo mais elevado e Perafita e Viana do Castelo, por

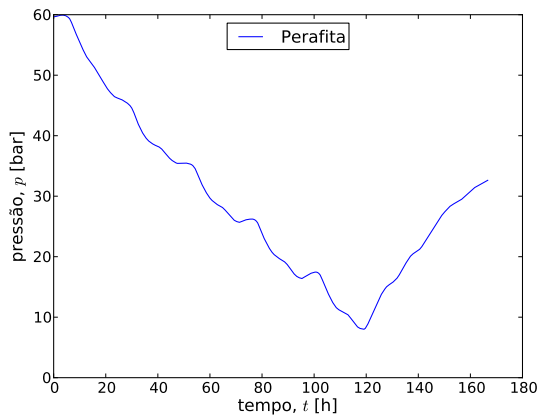
apresentarem os valores de pressão mais baixos da rede nacional.



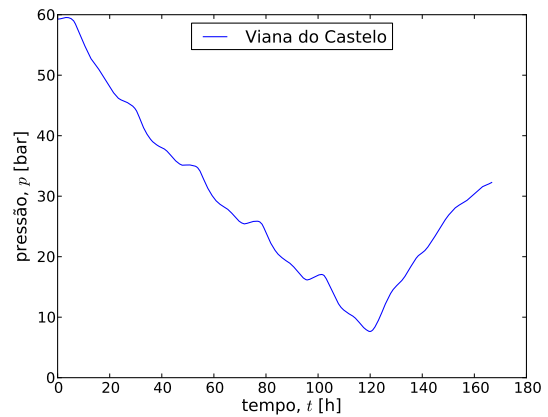
(e) Central termoelétrica do Ribatejo.



(f) Central termoelétrica da Tapada do Outeiro.



(g) Perafita.



(h) Viana do Castelo.

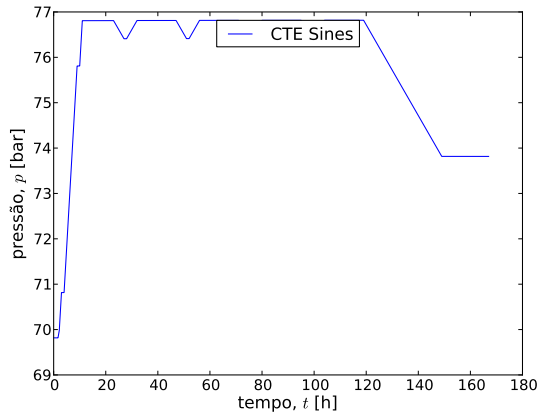
Figura 3.5: Flutuação da pressão ao longo de uma semana de trabalho da rede supondo a adição do lote 9 entre Celorico da Beira e Vale de Frades e o fecho da válvula em Campo Maior (figuras (e) a (h)).

Os gráficos acima representam o fecho da válvula em Campo Maior. Podem-se observar bastantes diferenças em relação aos casos anteriores. Analisando as figuras 3.5g e 3.5h, que são os casos em que a pressão atinge valores menores, percebe-se que os requisitos mínimos da pressão de fornecimento (45 bar) foram largamente excedidos, atingindo 8,3 bar em Viana do Castelo e 8,5 bar em Perafita. Outra observação que pode ser retirada, é que nas estações mais distantes, a pressão cai a pique, adoptando um comportamento cada vez mais linear até ao final da semana, seguindo-se o tradicional aumento do *linepack* ao sábado e ao domingo.

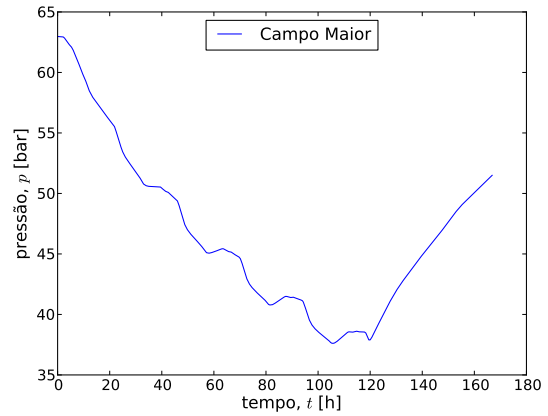
Dito isto, é facilmente perceptível que o terminal de Sines é incapaz de fornecer todo o país tendo em conta o dimensionamento actual da rede. É, então, necessário encontrar alternativas

para que a rede continue a funcionar de forma eficiente, mesmo com o fecho da válvula em Campo Maior.

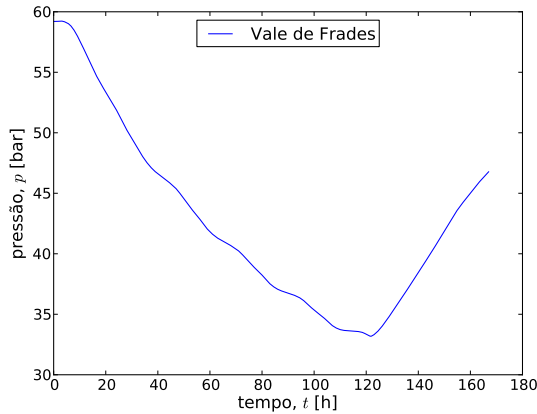
3.3.1 Alternativa 1



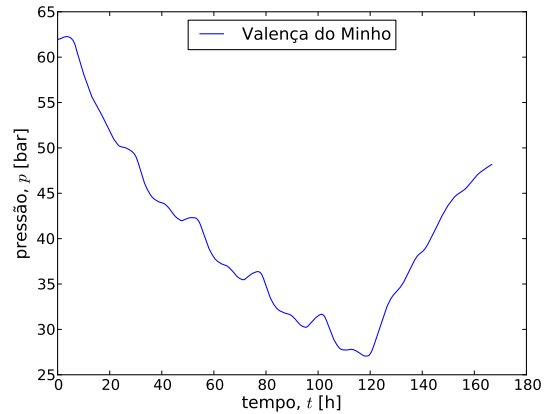
(a) Terminal de Sines.



(b) Campo Maior.



(c) Vale de Frades.



(d) Valença do Minho.

Figura 3.6: Flutuação da pressão ao longo de uma semana de trabalho da rede supondo a adição do lote 9 entre Celorico da Beira e Vale de Frades, o fecho da válvula em Campo Maior e o paralelo de condutas entre Sines e Cartaxo (figuras (a) a (d)).

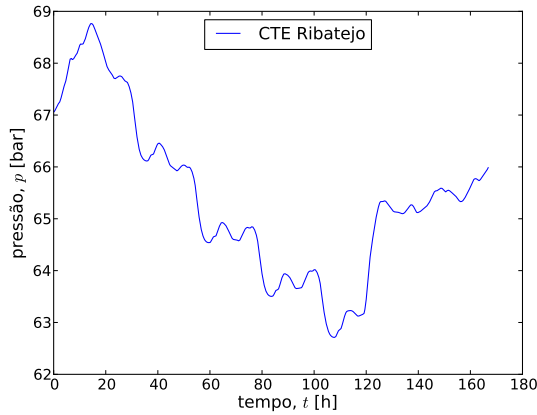
A partir da equação de estado, pode-se obter a seguinte expressão em função da pressão:

$$p = \frac{nRT}{V}, \quad (3.1)$$

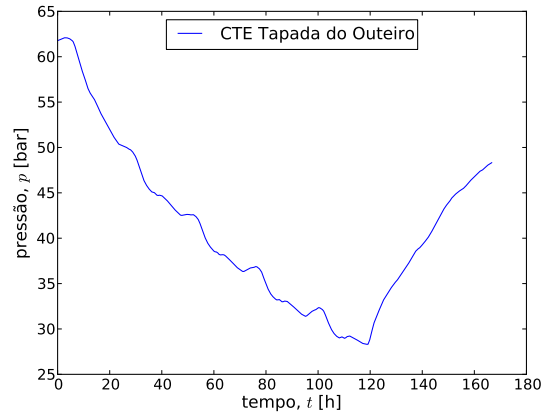
em que n é o número de moles do fluido. Manipulando o termo à direita, pode-se simplificá-lo da seguinte forma:

$$p = \rho \left(\frac{u}{L} \right)^2 A, \quad (3.2)$$

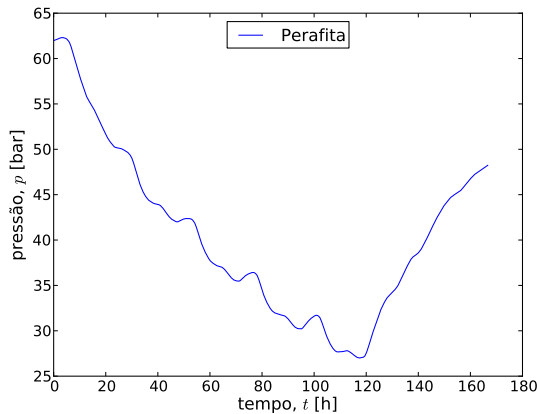
Facilmente se percebe que uma boa forma de aumentar a pressão, é aumentando a secção transversal das condutas. Esta alternativa passa por criar um troço igual e paralelo ao que liga Sines e Cartaxo. Em termos económicos é mais acessível, visto tratar-se de um investimento a longo prazo.



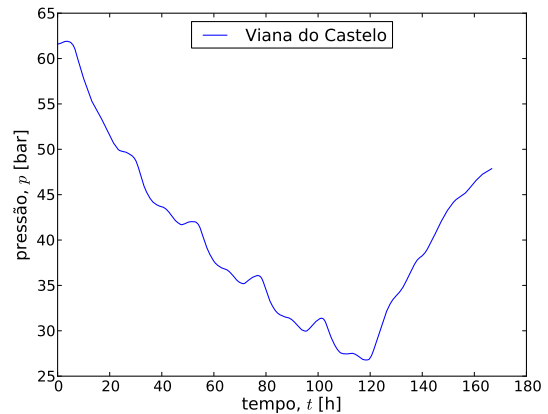
(e) Central termoelétrica do Ribatejo.



(f) Central termoelétrica da Tapada do Outeiro.



(g) Perafita.



(h) Viana do Castelo.

Figura 3.6: Flutuação da pressão ao longo de uma semana de trabalho da rede supondo a adição do lote 9 entre Celorico da Beira e Vale de Frades, o fecho da válvula em Campo Maior e o paralelo condutas entre Sines e Cartaxo (figuras (e) a (h)).

Algumas curiosidades acerca desta modelação:

- o primeiro elemento foi construído considerando apenas a existência de um gasoduto, com o dobro do diâmetro, o que faz com a área da secção transversal seja aproximadamente quatro vezes superior à inicial. Os restantes elementos ocuparão apenas metade dessa área. Como se tem visto ao longo desta dissertação, as condutas principais (aquelas que têm origem em Sines e no Campo Maior) são as que têm um diâmetro superior. Isto acontece para que a queda de pressão não seja tão acentuada face à extensão dos tubos. Então,

pode-se concluir, que neste casos, é uma boa abordagem considerar a secção transversal deste troço superior aos restantes.

- no dimensionamento da rede foi tido em conta a travessia do rio Sado entre as estações de Santo André e Mitrena, já que a facilidade de acesso e a elevada profundidade do leito do rio implicariam gastos económicos elevados.

Foram adicionados, no total, 7 nós e 9 elementos ao dimensionamento da rede (há mais troços por causa do afunilamento e posterior divergência no rio Sado). A restante estrutura manteve-se inalterada (figura C.7, consultar apenas o dimensionamento apresentado, os consumos contradizem os resultados que serão apresentados nesta secção). As figuras seguintes facultam a evolução da pressão, tendo em consideração as alterações mencionadas anteriormente.

Analisando os gráficos, uma vez mais se percebe que, apesar das melhorias (desta vez, a pressão atingida em Perafita e em Viana do Castelo foi de, respectivamente, 27,1 e 27,0 bar), a pressão de fornecimento continua a não ser respeitada. O facto de se ter obtido um aumento de quase 20 bar, permite tirar algumas nuances acerca da utilidade de um gasoduto paralelo naquela região. Para isso, é importante analisar os gráficos das figuras 3.7a e 3.7b para se compararem as diferenças.

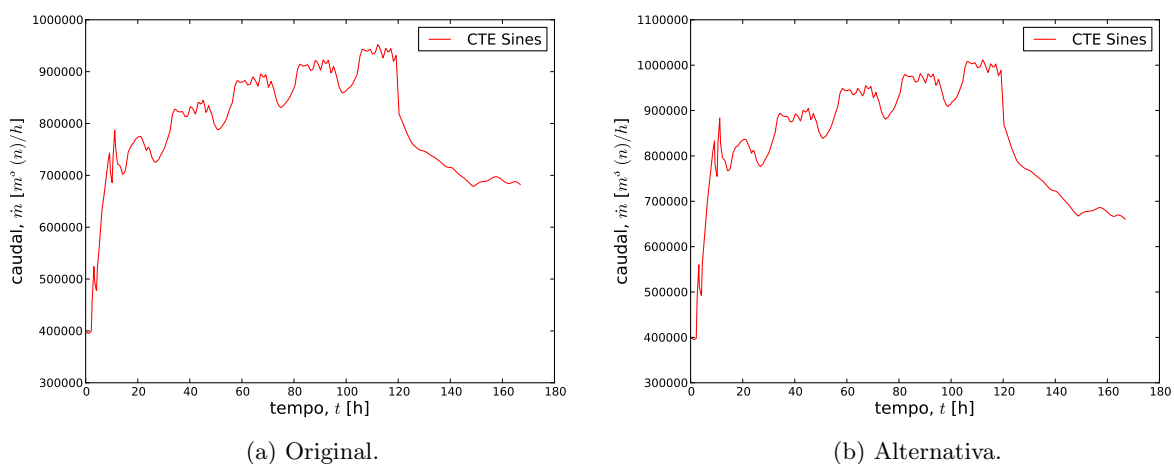


Figura 3.7: Comparação da flutuação do caudal mássico ao longo de uma semana de trabalho em Sines, quando se fecha a válvula em Campo Maior e para a sua alternativa.

Pelos gráficos de caudal, tira-se que a implementação um gasoduto paralelo não terá qualquer tipo de influência na flutuação da curva do caudal, mas antes na sua intensidade. Na alternativa existe uma translação vertical da curva de, aproximadamente, 100000 m³(n)/h, o que faz todo o sentido face ao aumento da secção transversal global para o dobro. Sabendo que

os consumos nos dois casos foram exactamente os mesmos em cada GRMS, sabe-se que este aumento de caudal em Sines provocará directamente uma diminuição do caudal de entrada nas restantes fronteiras, o que é uma boa medida a longo prazo.

Para finalizar, está mais que provado que este dimensionamento não é suficiente para compensar o fecho da válvula em Campo Maior, pelo que é necessário encontrar-se outra alternativa que permita colmatar as baixas pressões nas zonas mais afastadas da rede. A secção seguinte apresenta uma solução possível.

3.3.2 Alternativa 2

Seguindo, numa primeira fase, a metodologia utilizada na secção anterior, recorreu-se a uma implementação de condutas paralelas no lote 7 e no lote 1 até ao Cartaxo. Associando aquilo que foi referido anteriormente, é um investimento que compensa a longo prazo, tendo em conta que se viu uma poupança na importação de cerca de $100000 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$.

A segunda fase passou por introduzir duas condições de fronteira de pressão em Vale de Frades e em Valença do Minho. Para se respeitar o acordo da pressão de fornecimento, era preciso que nesses dois pontos a pressão fosse sempre superior a 45 bar. A partir dessas condições tirou-se a quantidade de caudal de gás natural que é necessário importar para que exista acumulação de gás suficiente para cumprir esses requisitos.

Nesta simulação existiu uma pequena alteração em relação às anteriores, relativamente aos casos em que a pressão atinge os valores menores. Em vez de ser em Perafita e Viana do Castelo, passou a ser em Perafita e na central termoeléctrica da Tapada do Outeiro, com 48,4 e 48,5 bar, respectivamente (figuras 3.8g e 3.8f). Este mínimo foi obtido numa quinta-feira às 10 horas (hora 82).

Observando os gráficos, denota-se a mesma tendência dos outros casos: os dias úteis são os dias de maior consumo, pelo que a pressão atinge valores bastante inferiores aos do fim-de-semana. A figura 3.8a é onde foi aplicada a condição de fronteira, daí que apresente um comportamento distinto dos restantes pontos de interesse. A mesma situação acontece com a figura 3.8c, mas esta apresenta um comportamento distinto relacionado com os consumos e os caudais provenientes das outras GRMS e, também, por ser um fornecedor principal, a par do terminal de Sines. Relativamente às outras figuras que se comportam dentro do previsto, estas

exibem maiores flutuações num menor espaço de tempo (reparar na curva ao fim-de-semana nas figuras 3.8d e 3.8h). A justificação é, novamente, simples: durante a semana, como o consumo é muito intenso, os valores de pressão baixam, no fim-de-semana existe uma maior redução dos consumos e, principalmente, as centrais termoeléctricas encerram ou reduzem serviços de forma muito acentuada, o que provoca um acumular de gás nas condutas provocando o respectivo aumento da pressão.

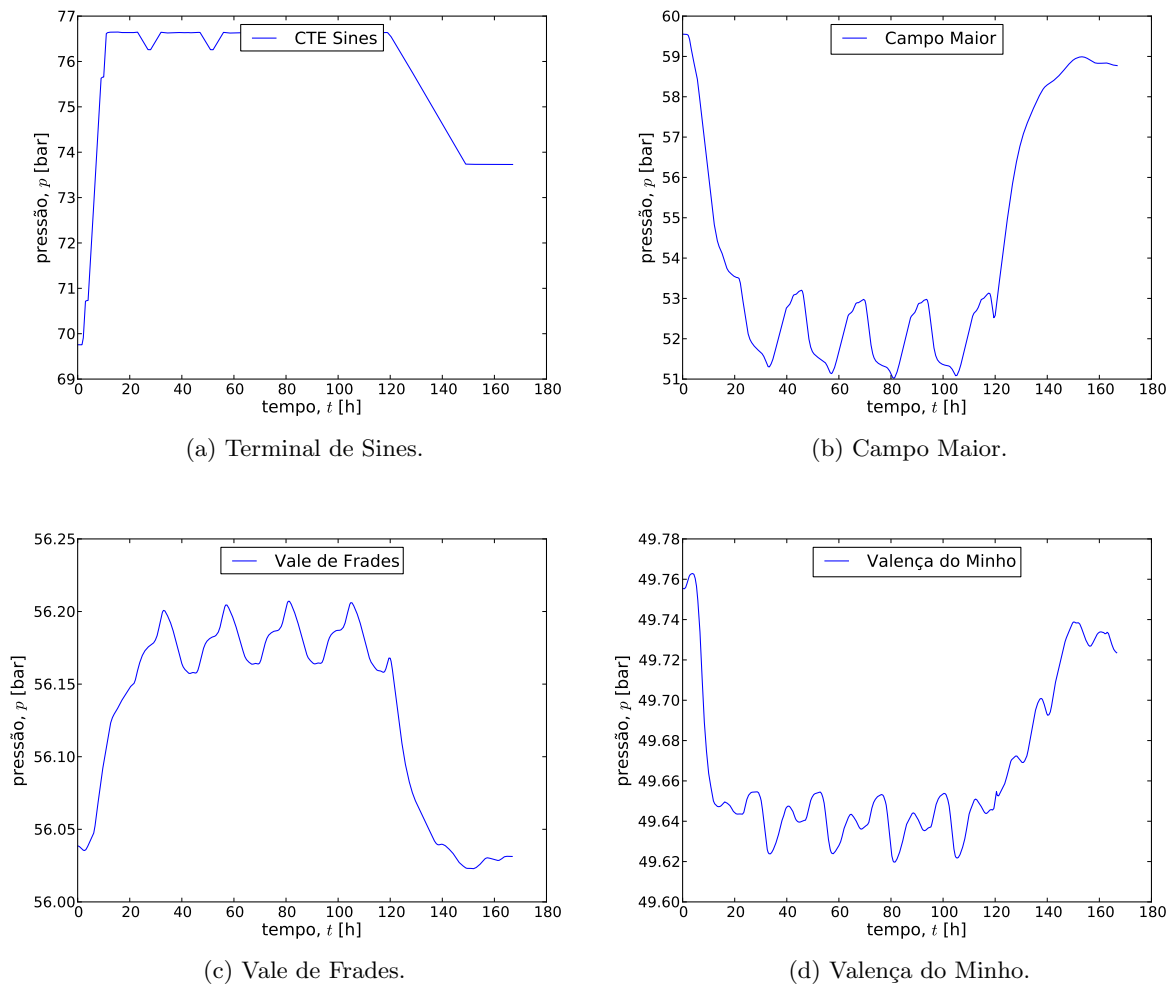
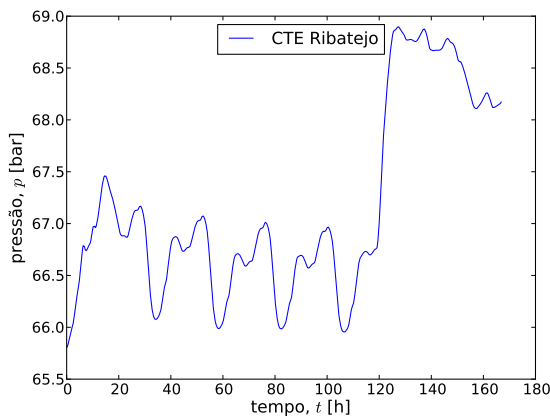


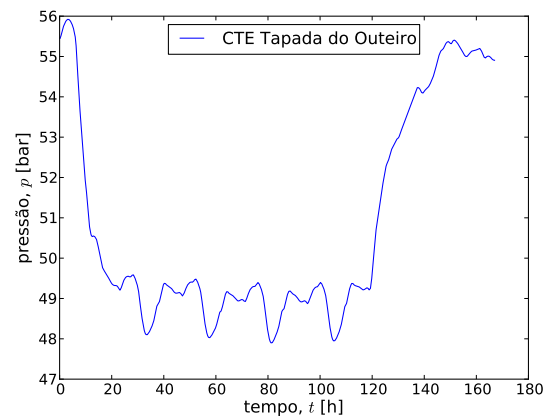
Figura 3.8: Flutuação da pressão ao longo de uma semana de trabalho da rede supondo a adição do lote 9, o fecho da válvula em Campo Maior, o paralelo condutas entre Sines e Cartaxo e a imposição de pressões em Vale de Frades e Valença do Minho (figuras (a) a (d)).

A evolução da pressão ao longo do dia acaba por variar pelas mesmas razões que foram referidas antes. Durante o dia o consumo é mais intenso, pelo que não existe acumulação do fluido nas condutas, provocando uma diminuição dos níveis de pressão. À noite acontece a situação inversa.

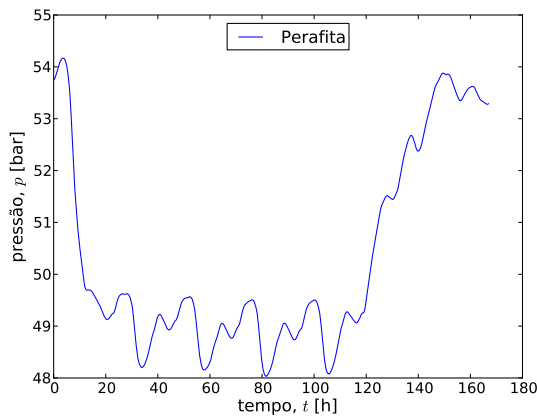
Ao serem analisados os gráficos nota-se uma diferença ao fim-de-semana, principalmente na central termoeléctrica do Ribatejo. Ao invés da pressão aumentar continuamente até domingo, esta atinge o pico durante a tarde de sexta-feira e depois vai descendo com algumas flutuações. Este pormenor é justificado pelas condições de fronteira de pressão impostas em Valença do Minho e Vale de Frades. Isso implica que o método vai estar sempre dependente do consumo de todas as GRMS, pelo que a resposta do caudal mássico vai chegar sempre com um ligeiro atraso. Quando é atingido um determinado valor de pressão acima do expectável, é injectado gás na rede para repor e estabilizar a circulação do fluido (figuras 3.9a e 3.9c).



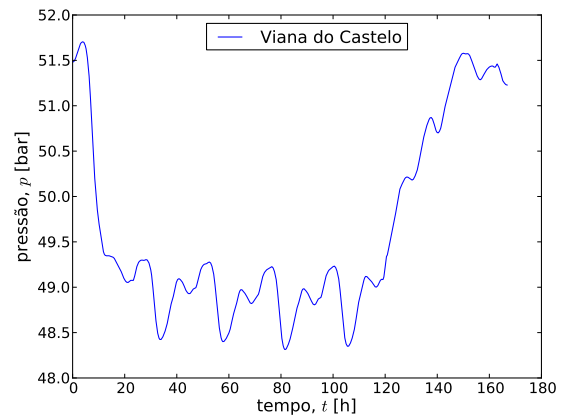
(e) Central termoeléctrica do Ribatejo.



(f) Central termoeléctrica da Tapada do Outeiro.



(g) Perafita.



(h) Viana do Castelo.

Figura 3.8: Flutuação da pressão ao longo de uma semana de trabalho da rede supondo a adição do lote 9, o fecho da válvula em Campo Maior, o paralelo condutas entre Sines e Cartaxo e a imposição de pressões em Vale de Frades e Valença do Minho (figuras (e) a (h)).

Os gráficos de caudal mássico permitem responder a algumas variações em relação às simulações anteriores. Rapidamente se percebe que, tal como nos gráficos de pressão, o fornecimento de gás durante os dias úteis é bastante mais intenso que nos fins-de-semana.

Comparando os dois gráficos de Vale de Frades percebe-se que o de caudal é uma resposta ao de pressão, para manter a linha o mais estável precisa, e por essa razão apresenta um pequeno atraso nas flutuações. A partir de sábado às 24 horas existe uma injeção de caudal, injeção essa que justifica o pico de pressão nos gráficos à sexta-feira.

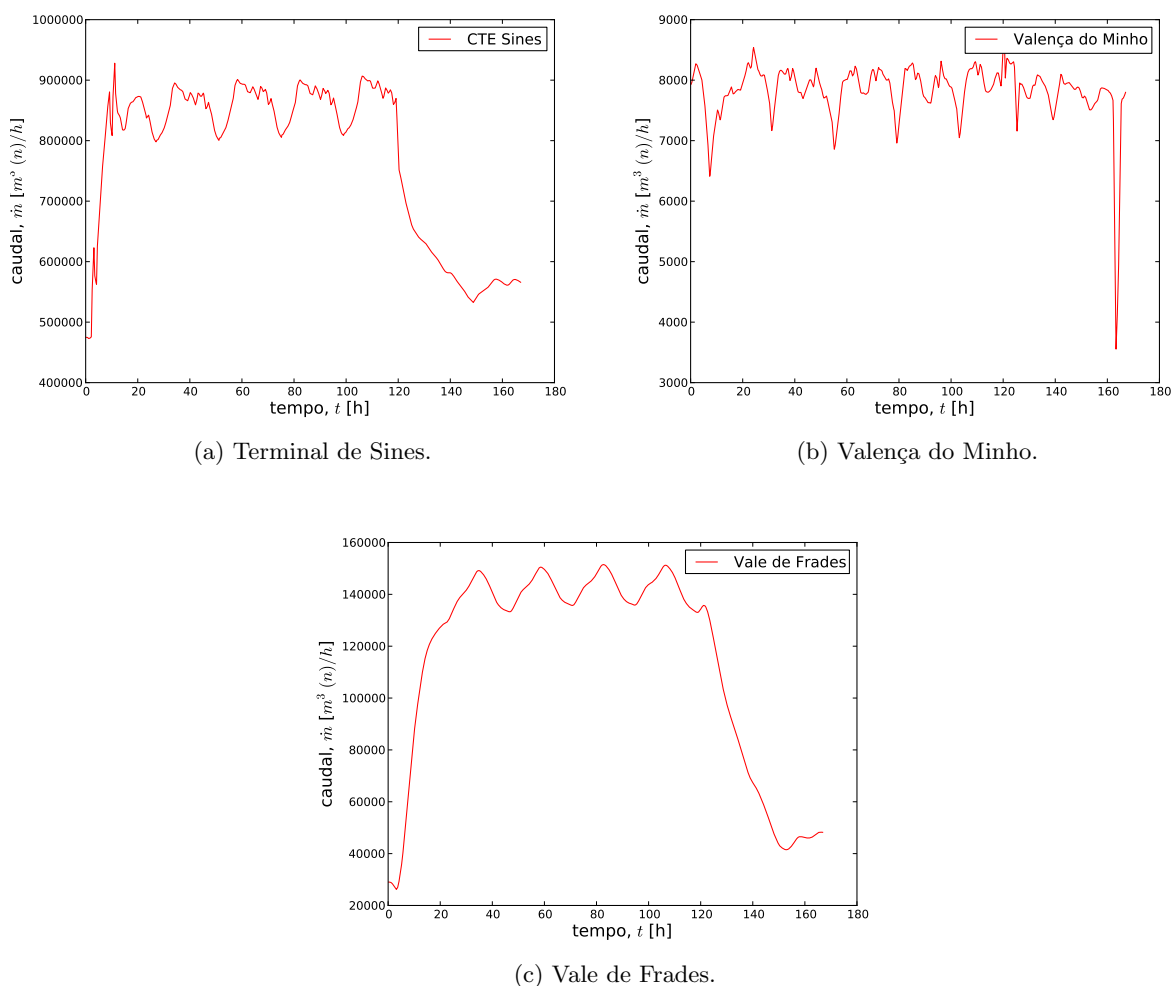


Figura 3.9: Flutuação do caudal mássico ao longo de uma semana de trabalho da rede supondo a adição do lote 9, o fecho da válvula em Campo Maior, o paralelo condutas entre Sines e Cartaxo e a imposição de pressões em Vale de Frades e Valença do Minho.

Um dado curioso é o facto do terminal de Sines apresentar valores de caudal muito próximos com o evoluir da semana, *i.e.*, não existe uma subida gradual tão acentuada como nas outras simulações. O mesmo comportamento ocorre com Vale de Frades, pelo que existe uma adaptação dos dois pontos de abastecimento a fim de serem cumpridos os requisitos. Em Valença do Minho o caudal injectado sofre muitas flutuações, mas a um nível minimamente constante, variando em grande parte da semana entre os 7000 e os 8000 $m^3(n)/h$, o que comparado aos restantes, é praticamente desprezável.

É possível confirmar uma diminuição do caudal em Sines, muito por causa da abertura da válvula em Vale de Frades. O caudal máximo injectado ocorre às 10 horas da manhã de segunda-feira, atingindo $925000 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$ (figura 3.9a). Durante os dias úteis, as flutuações variam, quase sempre, entre os 800000 e os $900000 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$. No fim-de-semana atinge um dos mínimos no final do dia de sábado, fornecendo cerca de $525000 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$ à rede. Como o valor da pressão imposta em Sines é muito próximo do máximo admissível na rede, pode-se afirmar que numa semana de consumos muito excessivos, apenas se conseguirá usar 70% da capacidade máxima de injeção de Sines.

Vale de Frades tem um aumento muito acentuado de caudal injectado durante a segunda-feira, entrado depois num ciclo que varia entre os 130000 e os $150000 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$ durante os dias úteis. No final do dia de sábado atinge um dos mínimos de fornecimento na rede, cerca de $40000 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$. As condições impostas nesta simulação impõe a importação do caudal da figura 3.9c à rede espanhola, em Zamora, para que os consumos de cada GRMS produza os gráficos de pressão mostrados anteriormente.

Como os gráficos da pressão cumprem os requisitos e os postos que atingem os valores mais baixos, Perafita e Tapada do Outeiro atingem valores superiores a 45 bar, e portanto, superiores à pressão de fornecimento, pode-se afirmar que, importando gás natural à rede espanhola por Vale de Frades, como demonstrado na figura 3.9c, é possível fechar a válvula em Campo Maior mantendo este dimensionamento sem que sejam desrespeitados os requisitos de pressão da RNTGN.

Capítulo 4

Conclusões

Como tem vindo a ser referido ao longo desta dissertação, recorreu-se aa algumas propriedades do MEF para se simularem escoamentos em regime transiente lento a fim de se analisar o fluxo real em sistemas complexos de gasodutos. O código actualizado demonstra o correcto dimensionamento da rede nos dias de hoje, facultando soluções dentro do expectável. As modificações realizadas, em especial a alteração das funções de criação das sub-rotinas e a optimização da assemblagem de matrizes, permitiram uma maior rapidez da simulação, poupando tempo ao utilizador, sem alterar a precisão dos resultados.

O código desenvolvido em python é muito directo, fácil de usar e proporciona ao utilizador uma elevada margem de manobra para que este possa alterar parâmetros e melhorar algumas funções do código. A simulação é realizada em poucos segundos e faculta, ainda, diagramas da rede bastante detalhados, permitindo ao operador confirmar se o dimensionamento da rede está de acordo com o esperado.

No primeiro caso constatou-se que a rede suporta todas as necessidades das GRMS e das centrais termoelectricas, respeitando os requisitos de pressão acordados internamente e com a rede espanhola e, ainda, abastecendo os clientes de forma estável. Os resultados obtidos podem vir a ser bastante proveitosos caso o projecto de construção do lote 9, que se encontra em fase de aceitação, venha a ser aprovado. Chegou-se à conclusão de que a rede tem capacidade para abastecer o novo troço respeitando a pressão de fornecimento. Testaram-se várias alternativas tendo em conta a proximidade da validade do contracto com Campo Maior ou um eventual acidente de trabalho nesse troço, que implicará um fecho da válvula. Aquela que cumpriu os requisitos impostos na rede consistiu em duas fases: um paralelo de gasodutos com o mesmo

diâmetro entre Sines e Cartaxo e a importação de gás natural a Zamora, na rede espanhola, cujo valor máximo de importação corresponderia a aproximadamente 36% do valor máximo importado a Campo Maior. Esta simulação tem valor para vir a ser estudada futuramente a fim de se saber se apresentará um lucro económico superior ao da rede actual e, em caso afirmativo, se compensará o investimento e manutenção a longo prazo.

Futuramente, propõe-se que venha a ser desenvolvido um modelo que permita introduzir um compressor na Bidoeira, visto tratar-se de um nó central da rede que estabelece a ligação entre 4 troços. A implementação do compressor permitirá aumentar os valores da pressão a partir desse ponto, diminuindo, assim, a sua queda ao longo da extensão da rede. Espera-se que possa vir a reduzir a quantidade de gás natural importado pela rede espanhola e, ao mesmo tempo, permita solucionar futuros problemas que possam ocorrer com o fornecimento de algum dos pontos de abastecimento da rede nacional.

Anexo A

Coeficiente de atrito

O parâmetro f , conhecido como factor de fricção, é um dos termos associados à força de atrito. Esta variável foi obtida experimentalmente, baseada numa expressão semi-empírica relacionada com um certo valor de rugosidade relativa, ϵ/D , para um determinado número de *Reynolds*, Re .

O diagrama de *Moody* permite seleccionar o valor adequado deste termo, já que se baseia num gráfico não-dimensional que associa o factor de fricção, f , o número de *Reynolds*, Re e a rugosidade relativa, ϵ/D , para um escoamento totalmente desenvolvido numa conduta circular (figura A.1).

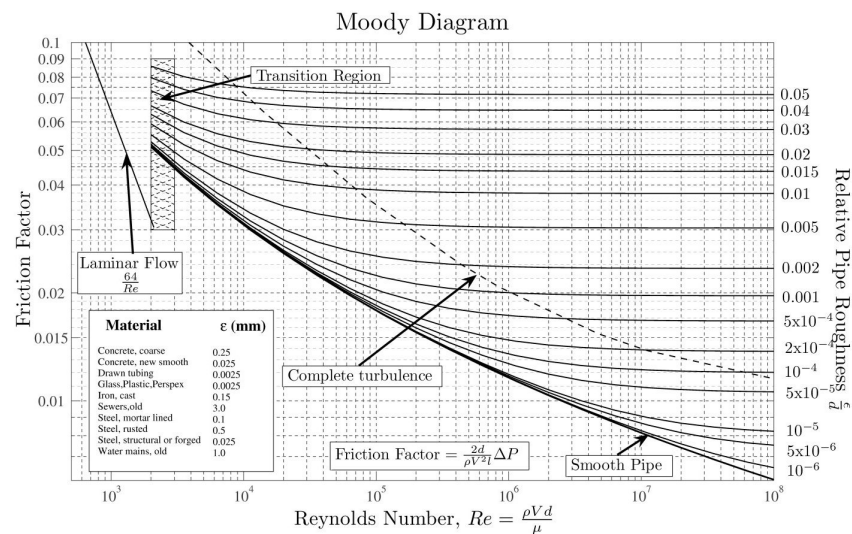


Figura A.1: Diagrama de Moody.

Analisando o diagrama de *Moody* percebe-se que os valores de f não correspondem aos

obtidos pelas equações (A.1) e (A.2), mas antes a $4f$. Ora, como o diagrama se encontra dividido em dois regimes de escoamento, um laminar e outro turbulento, baseados nas seguintes expressões:

- **Regime Laminar**, $Re_D < 2000$;

$$f = \frac{16}{Re}. \quad (\text{A.1})$$

- **Regime Turbulento**, $Re_D > 4000$, onde é aplicada a equação de Colebrook;

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4.0 \log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{1.25}{Re_D \sqrt{f}} \right). \quad (\text{A.2})$$

Nesta dissertação, determina-se f recorrendo a uma expressão dependente do número de Reynolds, Re , que é a seguinte:

$$f = a Re_D^{-b}, \quad (\text{A.3})$$

onde a e b são determinados através de um método computacional, que define uma curva a partir da equação (A.2), fixando um dado ϵ/D para uma certo leque de valores de Re_D .

Anexo B

Conservação do caudal nos nós

Para que se possa comprovar a veracidade do método dos elementos finitos considerou-se sem perda de generalidade uma cadeia de gás formada por três gasodutos (figura B.1), na qual cada uma das condutas representa um elemento.

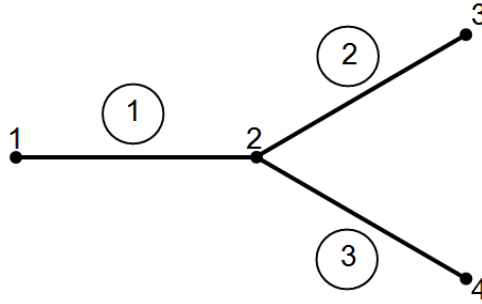


Figura B.1: Esquema da rede de gás composta por três condutas.

Aplicando a equação (2.63) à rede de gás apresentada na figura acima, rearranjando-a de forma a ficarem apenas zeros no segundo membro, obtém-se

$$C_{11}^1 \frac{\partial p_1}{\partial t} + C_{12}^1 \frac{\partial p_2}{\partial t} + \alpha_1 K_{11}^1 p_1 + \alpha_1 K_{12}^1 p_2 - [\beta \dot{m} \phi_i]_{x_1^1} = 0, \quad (\text{B.1})$$

$$C_{21}^1 \frac{\partial p_1}{\partial t} + C_{22}^1 \frac{\partial p_2}{\partial t} + \alpha_1 K_{21}^1 p_1 + \alpha_1 K_{22}^1 p_2 + [\beta \dot{m} \phi_i]_{x_2^1} = 0, \quad (\text{B.2})$$

$$C_{22}^2 \frac{\partial p_2}{\partial t} + C_{23}^2 \frac{\partial p_3}{\partial t} + \alpha_2 K_{22}^2 p_2 + \alpha_2 K_{23}^2 p_3 - [\beta \dot{m} \phi_i]_{x_2^2} = 0, \quad (\text{B.3})$$

$$C_{32}^2 \frac{\partial p_2}{\partial t} + C_{33}^2 \frac{\partial p_3}{\partial t} + \alpha_2 K_{32}^2 p_2 + \alpha_2 K_{33}^2 p_3 + [\beta \dot{m} \phi_i]_{x_3^2} = 0, \quad (\text{B.4})$$

$$C_{22}^3 \frac{\partial p_2}{\partial t} + C_{24}^3 \frac{\partial p_4}{\partial t} + \alpha_3 K_{22}^3 p_2 + \alpha_3 K_{24}^3 p_4 - [\beta \dot{m} \phi_i]_{x_2^3} = 0, \quad (\text{B.5})$$

$$C_{42}^3 \frac{\partial p_2}{\partial t} + C_{44}^3 \frac{\partial p_4}{\partial t} + \alpha_3 K_{42}^3 p_2 + \alpha_3 K_{44}^3 p_4 + [\beta \dot{m} \phi_i]_{x_4^3} = 0. \quad (\text{B.6})$$

A notação C_{ij}^k e K_{ij}^k assumem-se como as entradas ij da matriz para a conduta k e x_j^k o

ponto j de k . Realizando um balanço das equações (B.2), (B.3), (B.5), a fim de se comprovar a conservação do caudal no nó 2, obtém-se

$$\begin{aligned}
 & C_{21}^1 \frac{\partial p_1}{\partial t} + (C_{22}^1 + C_{22}^2 + C_{22}^3) \frac{\partial p_2}{\partial t} + C_{23}^2 \frac{\partial p_3}{\partial t} + C_{24}^3 \frac{\partial p_4}{\partial t} + \alpha_1 K_{21}^1 p_1 + \\
 & + (\alpha_1 K_{22}^1 + \alpha_2 K_{22}^2 + \alpha_3 K_{22}^3) p_2 + \alpha_2 K_{23}^2 p_3 + \alpha_3 K_{24}^3 p_4 + \\
 & + \beta \phi_i [\dot{m}_2^1 - \dot{m}_2^2 - \dot{m}_2^3] = 0.
 \end{aligned} \tag{B.7}$$

O balanço de massa da equação (B.7),

$$[\dot{m}_2^1 - \dot{m}_2^2 - \dot{m}_2^3] = 0, \tag{B.8}$$

é igual a 0, pelo que se confirma a conservação do caudal no nó 2 e, consequentemente, a conservação de caudal num nó. A equação (2.50) aparece multiplicada pela área para garantir a conservação do caudal na equação (B.7).

Anexo C

Diagramas da rede

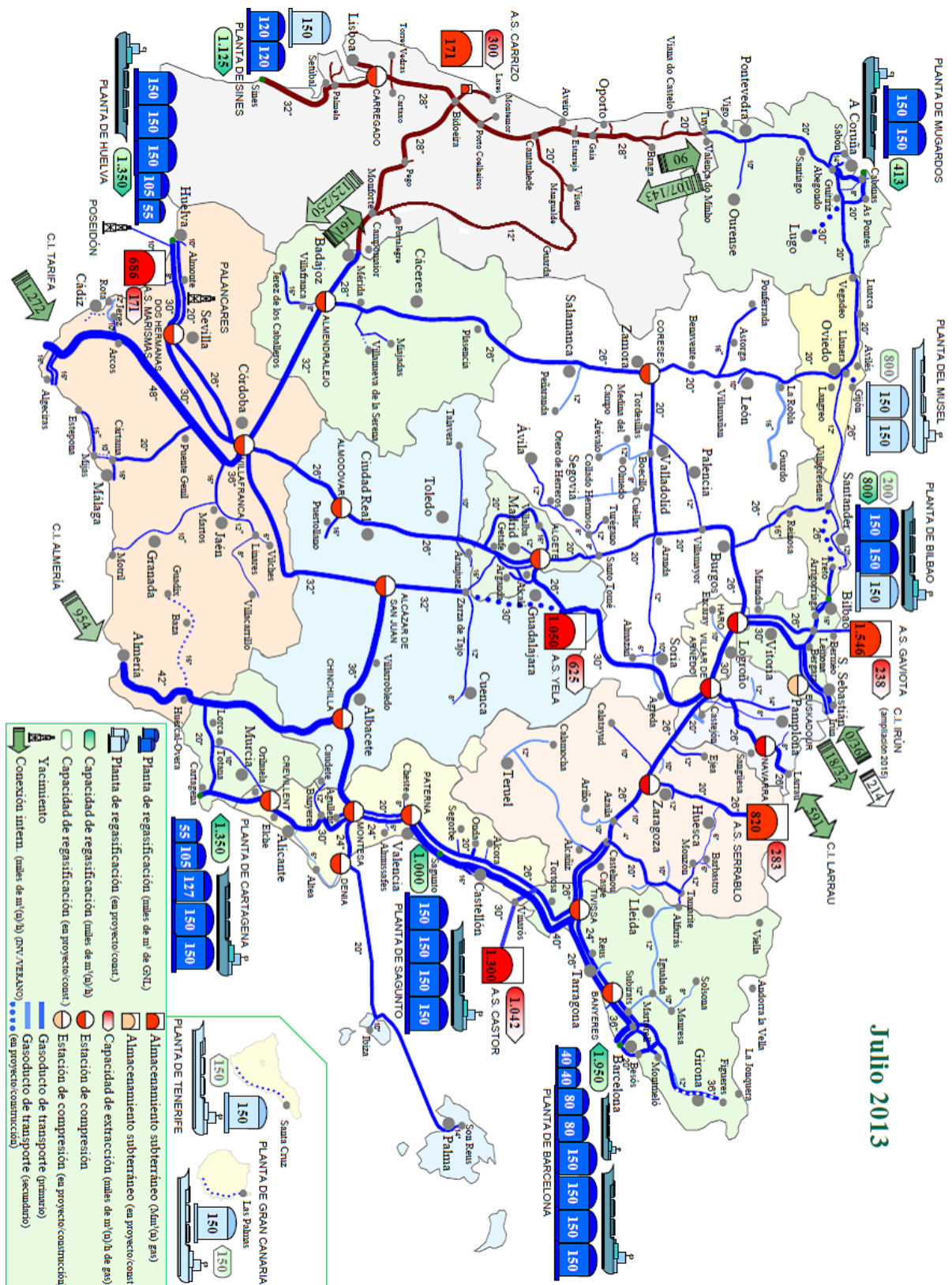


Figura C.1: Diagrama da rede ibérica de gasodutos.

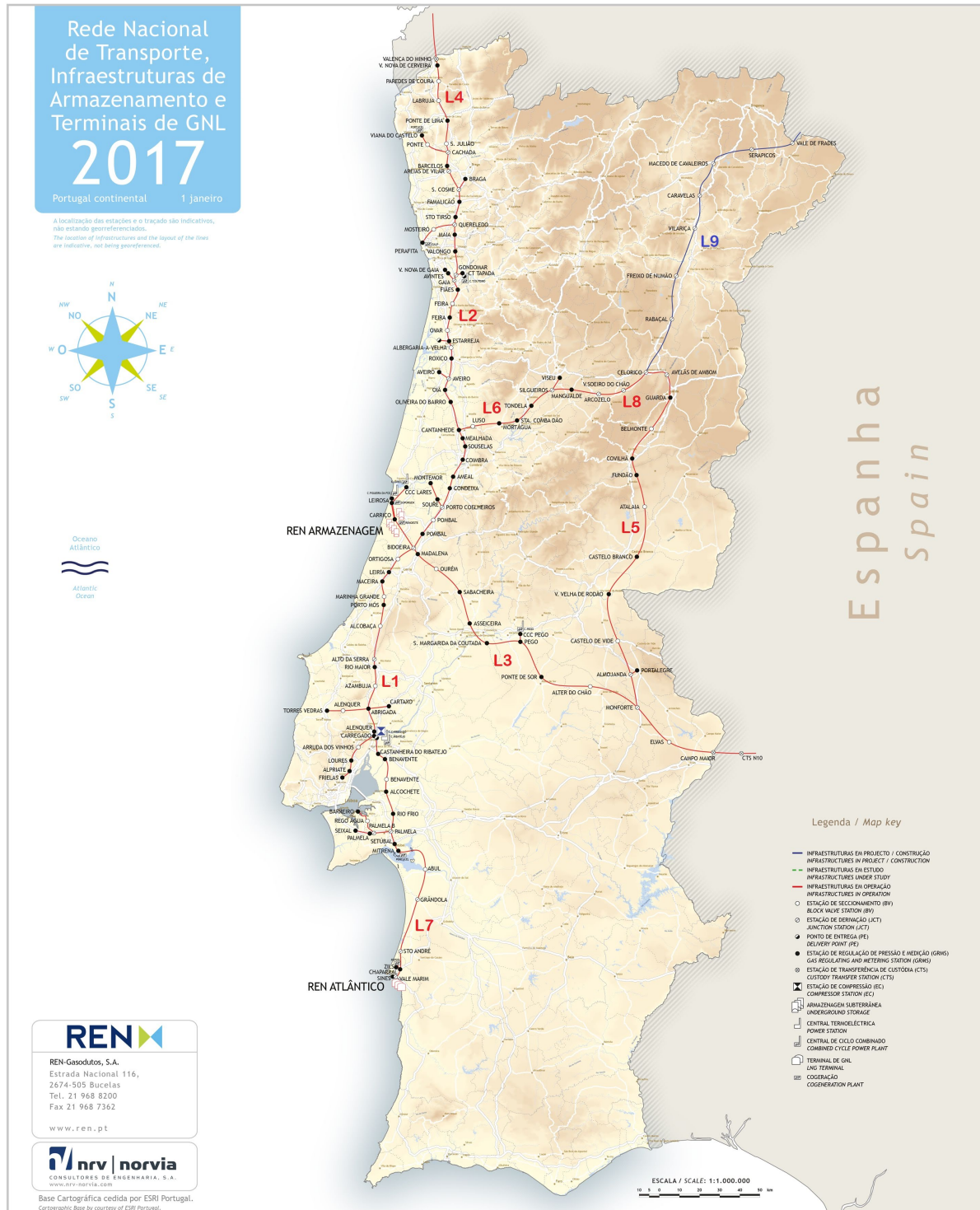


Figura C.2: Diagrama da RNTGN.



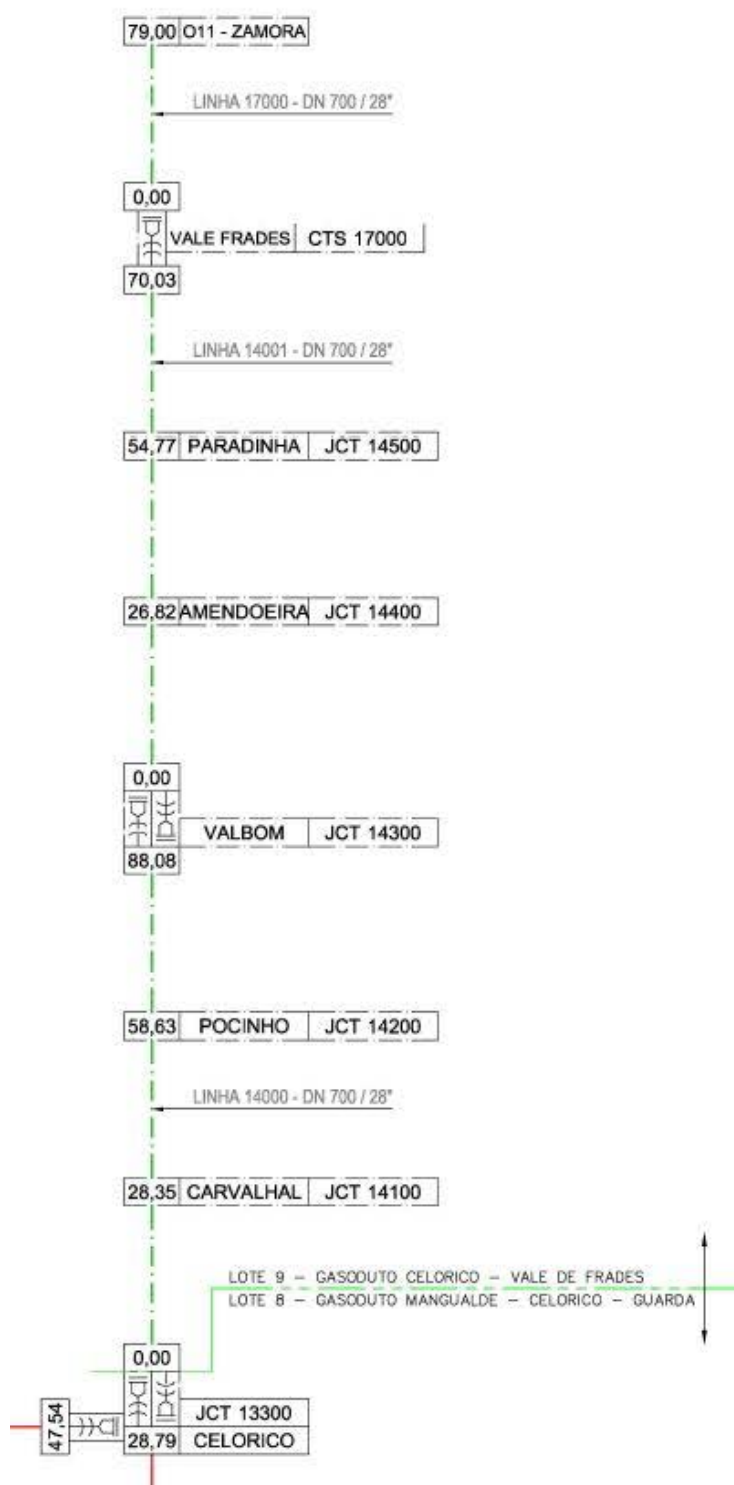


Figura C.4: Diagrama do lote 9 da RNTGN (adaptado de [36]).



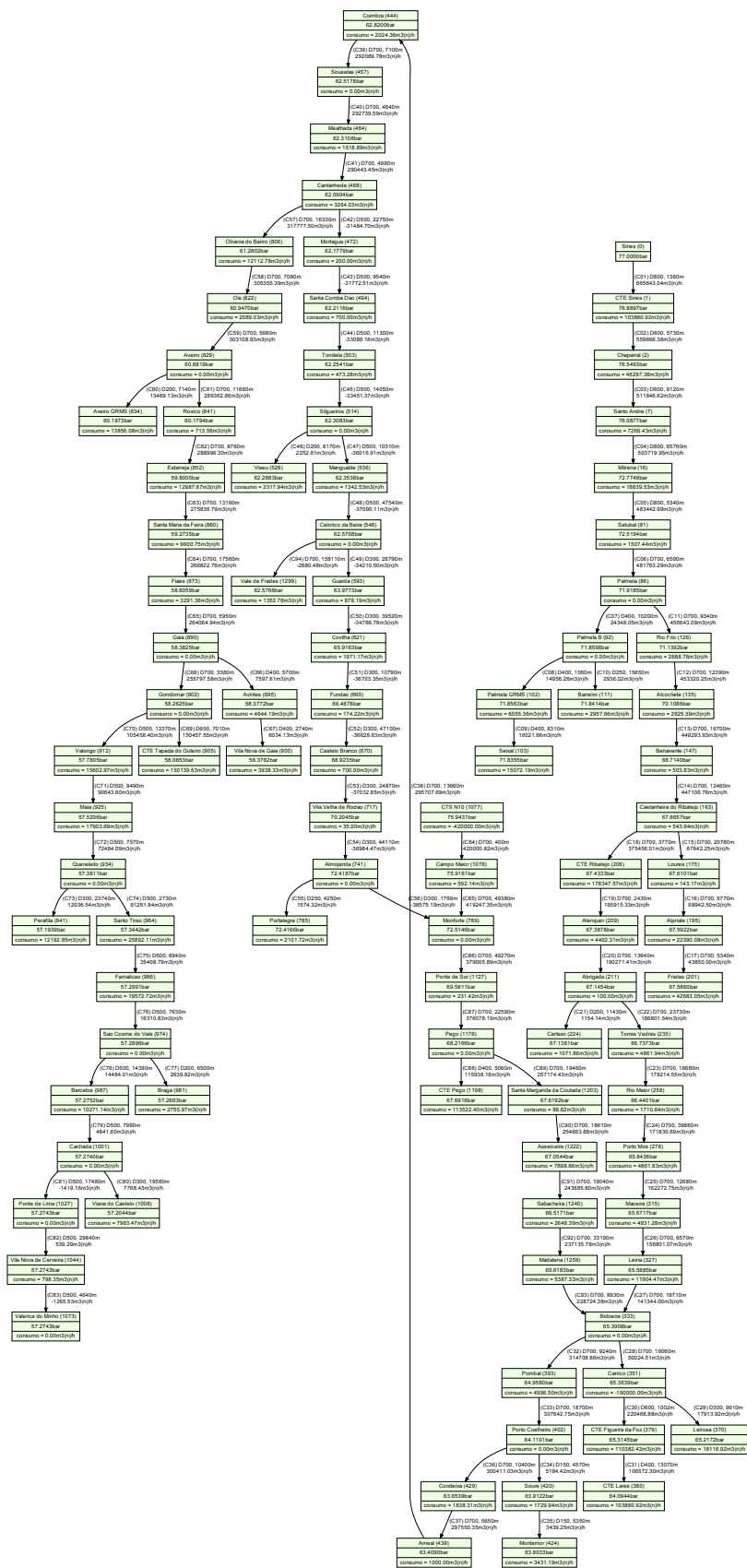


Figura C.6: Diagrama detalhado de consumos e pressões da RNTGN, tendo em consideração a hipotética entrada em funcionamento do lote 9.

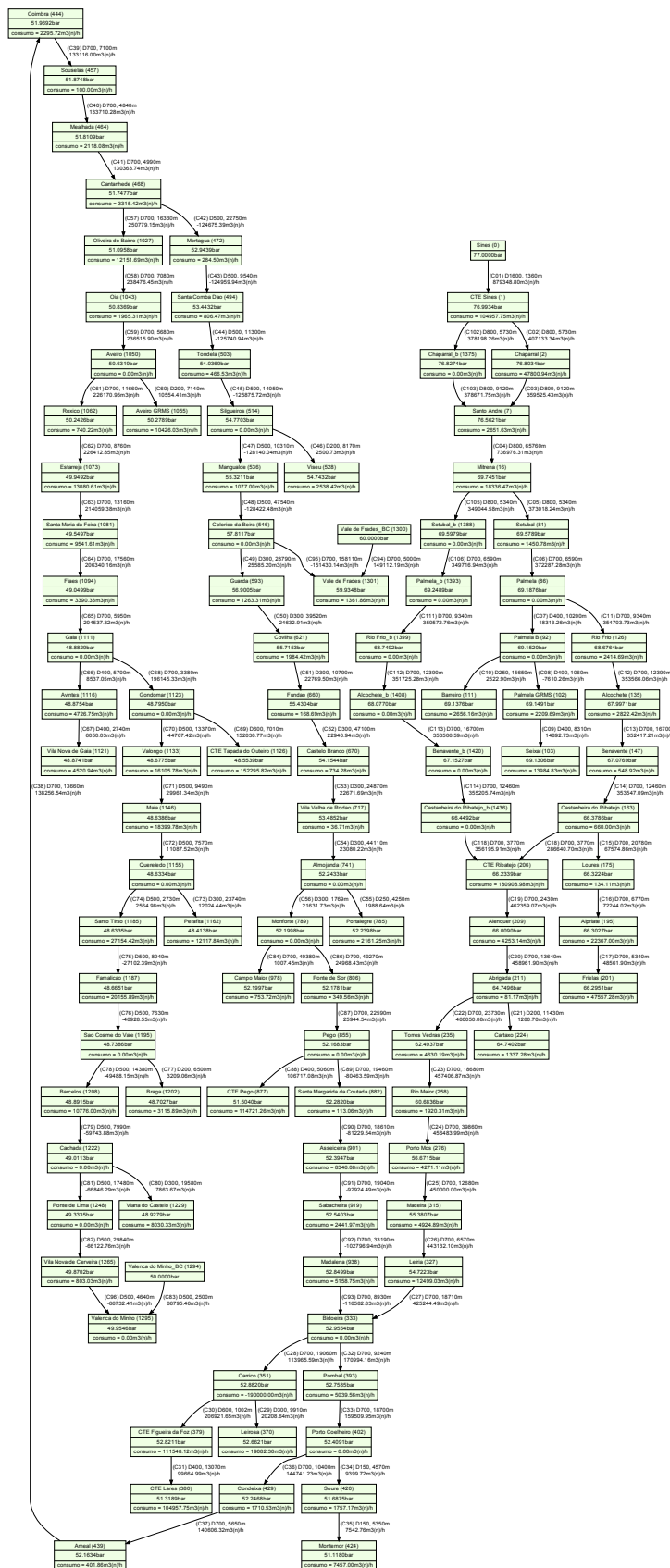


Figura C.7: Diagrama detalhado de consumos e pressões da RNTGN, tendo em consideração a hipotética entrada em funcionamento do lote 9 e um possível fecho da rede em Campo Maior.

Bibliografia

- [1] ERSE: *Caracterização do Sector do Gás Natural em Portugal*. Relatório Técnico, 2007.
- [2] Geologia, DG: *ENERGIA em Portugal*, 2015.
- [3] Portugal, EDP Energias de: *Energy Outlook 2017*, 2017. <http://alencastre.ipapercms.dk/EDP/digital-hub/energy-outlook-2017/>.
- [4] Statistics, I: *Key world energy statistics 2017*. International Energy Agency, 2017.
- [5] Osiadacz, A. J.: *Simulation and Analysis of Gas Networks*. E. & F. N. Spon Ltd., London, 1987.
- [6] Osiadacz, A. J.: *Different Transient Models - Limitations, Advantages and Disadvantages*.
- [7] Thorley, A. R .D. e C. H. Tiley: *Unsteady and transient flow of compressible fluids in pipelines: a review of theoretical and some experimental studies*. Int. J. Heat Fluid Flow, 8(1):3–15, 1987.
- [8] Cross, Hardy: *Analysis of flow in networks of conduits or conductors*. Relatório Técnico, University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. Engineering Experiment Station., 1936.
- [9] Goldwater, M. H., K. Rogers e D. K. Turnbull: *The PAN Network Analysis Program - its Development and Use*. 42nd Meeting, London, Communication 1009, 1976.
- [10] Goldwater, M. H. e A. E. Fincham: *Modelling of Dynamical Systems*. Peter Peregrinus, Stevenage, 1981.
- [11] White, F. M.: *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill, 5ª edição, 2003.
- [12] Shapiro, A. H.: *The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow*. Ronald Press Co., New York, 1954.

- [13] Osiadacz, A. J. e M. Chaczykowski: *Comparison of isothermal and non-isothermal pipeline gas flow models*. Chemical Engineering Journal, 81, 2001.
- [14] Osiadacz, A. J.: *Static and Dynamic Simulation of an Arbitrarily Configured Gas Transportation System*. NOT Sigma, Warsaw, 1982.
- [15] Osiadacz, A. J. *Int. J. Num. Meth. Fluids*, 3, 1983.
- [16] Osiadacz, A. J.: *Transient Simulation for Complex Gas Networks*. Praha, 1983. International Conference on Simulation and Control.
- [17] Aylmer, S.: *Interactive Gas Flow Analysis*. Tese de Doutorado, The University of Manchester Institute of Science and Technology, 1980.
- [18] Heath, M. J. e J. C. Blunt: *., I.G.E. Journal*, 1969.
- [19] Taylor, T. D., N. E. Wood e J. E. Powers. *Society of Petroleum Engineering Journal*, (10), 1962.
- [20] Ziólko, M.: *Dynamic Optimization of a Natural Gas Pipeline*. Tese de Doutorado, Stanislaw Staszic Academy of Mining and Metallurgy, Cracow, 1973.
- [21] Carnyj, I. A.: *Fundamentals of Gas Dynamics*. Gostoptiehzdat, Moscow, 1961.
- [22] Stoner, M. A.: *Analysis and Control of Unsteady Flows in Natural Gas Piping Systems*. Journal of Basic Engineering, 1969.
- [23] Pascal, H. e E. Aberta: *Nonsteady Gas Flow through Pipeline Systems*. Acta Mechanica, 42, 1982.
- [24] Osiadacz, A. J. e M. Yedrouj: *A Comparison of a Finite Element Method and a Finite Difference Method for Transient Simulation of a Gas Pipeline*. Appl. Math. Modelling, 13, 1989.
- [25] Mekebel, S. e J.C. Loraud: *Study of a Variable Flow in Natural Gas Pipelines*. International Chemical Engineering, 25, 1985.
- [26] Abott, M. B.: *An Introduction to the Method of Characteristics*. Elsevier, New York, 1966.
- [27] Berezin, I. S. e N. P. Zhidkov: *Computing Methods*. Addison-Wesley, 1965.

- [28] Gato, L. M. C. e J. C. C. Henriques: *Dynamic behaviour of high-pressure natural-gas flow in pipelines*. International Journal of Heat and Fluid Flow, 26(5):817 – 825, 2005, ISSN 0142-727X. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142727X05000408>.
- [29] Becker, E. B., G. F. Carey e J. T. Oden: *Finite Elements - An Introduction*, volume I. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1981.
- [30] Pina, H.: *Métodos Numéricos*. McGraw-Hill, 1995.
- [31] Duff, I. S., A. M. Erisman e J. K. Reid: *Direct Methods for Sparse Matrices*. Oxford University Press, Oxford, 1986.
- [32] Geus, R., D. Wheeler e D. Orban: *Pysparse Documentation, Release 1.0.2*. 2008.
- [33] Gato, L. M. C.: *Simulação da RNTGN: Estudo Preliminar*. IDMEC, ERSE, Outubro 2007.
- [34] Serviços Energéticos, ERSE Entidade Reguladora dos: *CARACTERIZAÇÃO DA PROCURA DE GÁS NATURAL NO ANO GÁS 2017-2018*, 2017. <http://www.erse.pt/pt/gasnatural/tarifaseprecos/20172018/Paginas/default.aspx>.
- [35] Energia, DGEG Direção Geral de e Geologia: *ENERGIA em Portugal*, 2016. <https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjrsboyvvcAhUyxIUKHTdQBLYQFjAAegQIAhAC&url=http%3A%2F%2Fwww.dgeg.gov.pt%2Fwwwbase%2Fwwwinclude%2Fficheiro.aspx%3Faccess%3D1%26id%3D15139&usq=A0vVaw1sXFslF4EHuSXW9ndRKL8B>.
- [36] REN Redes Energéticas Nacionais, SGPS, S.A.: *PDIRGN '15 - PLANO DE DESENVOLVIMENTO and INVESTIMENTO DA RNTIAT*, 2015. [file:///C:/Users/arape/Desktop/PDIRGN%202015%20\(Período%202016%20-%202025\)_Ver%201.pdf](file:///C:/Users/arape/Desktop/PDIRGN%202015%20(Período%202016%20-%202025)_Ver%201.pdf).