

Gestão de contratos de gás natural liquefeito com opção de cancelamento

Alunos: Carlos Alberto Correa López

Sergio Omari Romani

Orientador: Vincent Gérard Yannick Guigues

1. INTRODUÇÃO

As empresas que negociam gás natural costumam gerenciar uma ampla gama de contratos para diferentes tipos de clientes com demandas específicas. Geralmente as reservas de gás natural não são suficientes para satisfazer a demanda dos clientes. Assim o gás natural liquefeito (GNL) ou LNG (*Liquefied Natural Gas*) em inglês, aparece como uma opção de complemento para o gás natural. Uma mistura adequada de contratos de gás natural e gás natural liquefeito além de diversificar as opções das companhias de gás, as ajuda a lidar melhor com os riscos envolvidos na negociação dos seus produtos. No setor do gás existem riscos relativos à volatilidade dos preços do gás assim como a necessidade de entregar sem falta as cargas de gás a clientes que não podem ter seu fluxo de gás interrompido, os quais são clientes importantes para o setor. Esta conjectura faz com que as empresas procurem métodos para otimizar o controle dos contratos, visando diminuir custos relativos

Os contratos de gás natural liquefeito oferecem opções de entrega de cargas em certas datas e volumes específicos. Ao mesmo tempo estes contratos podem ser cancelados, por parte do comprador, mediante o pagamento de uma multa, sendo que o valor desta aumenta conforme a proximidade da data de entrega. Por esta razão é importante tentar determinar as cargas a serem canceladas.

Este projeto de iniciação científica teve como objetivo a obtenção de uma ferramenta digital que permitisse prever as possíveis cargas a serem canceladas dos contratos de gás natural liquefeito, assim como o estudo de diferentes cenários de demanda de gás natural, por

meio da aplicação de um modelo de otimização linear com ajuda de softwares especializados. É importante ressaltar que o código pode ser aplicado a outras commodities e não somente gás natural liquefeito. Por último foram analisados diferentes cenários com ajuda do programa.

Cabe ressaltar que embora existam alguns trabalhos sobre problemas de gestão de carteiras de contratos de gás ([2],[4],[5],[6]), no nosso conhecimento a introdução de contratos com opção de cancelamento só foi considerada na referência [1].

A estrutura do documento é a seguinte: primeiramente, na seção dois, será apresentada uma visão geral do problema. Na seção três, fornecemos a modelagem correspondente. Finalmente, na última seção, apresentamos resultados numéricos obtidos aplicando nossa metodologia para uma grande empresa brasileira do setor energético.

2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Primeiramente foi necessário estudar e entender a dinâmica da venda e da logística de transporte do gás natural, pois o programa foi idealizado com a intenção de se ter uma idéia dos contratos que irão ser cancelados pela companhia compradora do gás natural liquefeito. A seguir é apresentado um diagrama da rede de abastecimento de gás.

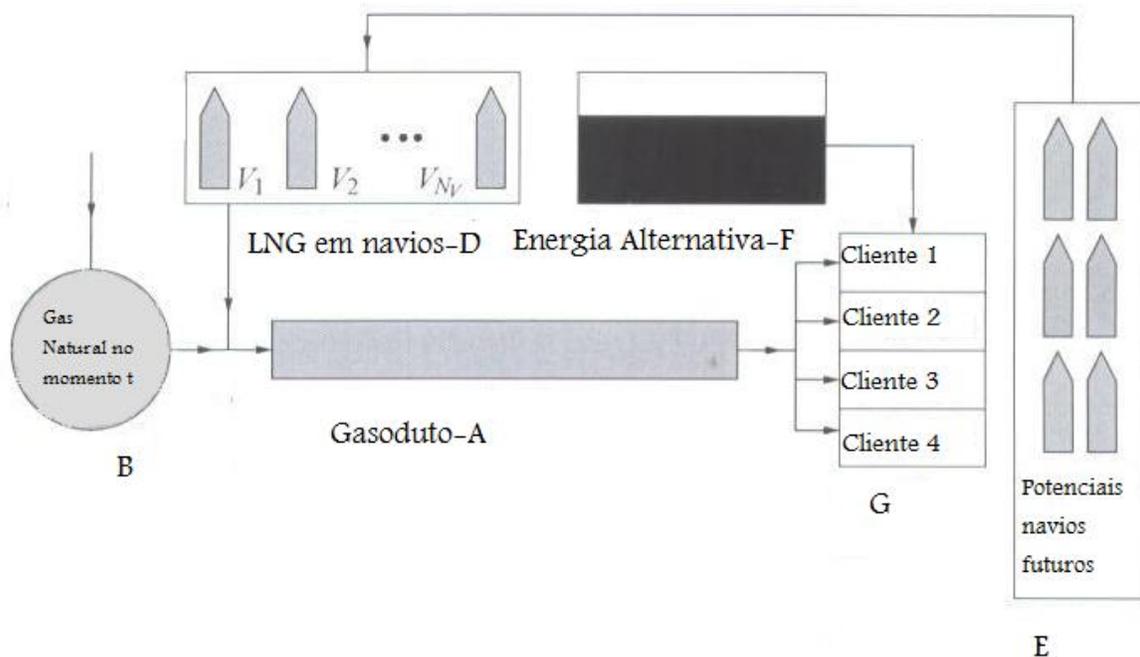


Fig. 1-Rede de abastecimento de gás

Foram considerados três tipos de energia que podem atender os clientes através dos gasodutos: gás natural liquefeito, gás natural e uma energia alternativa, a qual pode ser de qualquer tipo. O gás natural liquefeito é entregue por navios de carga que esperam no porto até serem completamente esvaziados. Ao mesmo tempo são considerados limites mínimos e máximos para a capacidade do gasoduto. O problema foi investigado em um horizonte de tempo supondo que a demanda, as multas, as penalidades por ter a demanda de um cliente não satisfeita, a demanda futura e os preços de compra e venda do gás não variam no intervalo de tempo determinado e são conhecidos. Não foi considerada a presença de armazéns nos quais poderia ser mantido o gás, pois no Brasil, que consideramos nesse estudo, não existem armazéns.

A demanda foi segmentada em quatro tipos diferentes de clientes

- Clientes que aceitam outro tipo de energia alternativa que não o gás, quando há falta deste. Normalmente essas energias alternativas apresentam um custo mais elevado. Os clientes pagam o preço do contrato independentemente se a demanda foi atendida apenas por gás além desse, energia alternativa. A demanda destes clientes é sempre satisfeita.
- Clientes que podem não ter sua demanda de gás satisfeita sem que haja o pagamento de uma multa.
- Clientes que quando sua demanda não for satisfeita, há o pagamento de uma multa de alto valor.
- Usinas térmicas a gás com altas penalidades para pagar quando a demanda (que é sazonal) é deixada insatisfeita

O problema foi estudado em um intervalo de tempo determinado. O programa oferece a possibilidade de gerenciar diversos contratos, sendo que cada contrato possui um número

determinado de cargas. Cada carga possui uma data de entrega e uma data a partir da qual é possível seu cancelamento, dentro do intervalo de tempo determinado. Cada período de tempo entre estas duas datas possui uma opção de cancelamento para a carga com valores de multas previamente determinadas.

3. MODELAGEM

O modelo utilizado como base para o desenvolvimento do código pode ser encontrado na seguinte publicação [1].

Para fins práticos foram feitas algumas modificações na modelagem original. Um exemplo disto é a exclusão dos armazéns subterrâneos do modelo. A seguir é apresentado o modelo utilizado

3.1 Modelo dos contratos de LNG e opções de cancelamento

Para o carregamento ℓ no contrato n , a variável binária $y_{nl}(t)$ é definida como 1 se a carga é cancelada no momento t , ou antes, e 0 caso contrário. A previsão da data de entrega sendo $t_n(l)$, podemos cancelar em qualquer data pertencente ao conjunto $\{t_n(0) + 1, \dots, t_n(l) - 1\}$. Para cada contrato $n = 1 \dots N$ e carga $\ell = 1, \dots, l_n$, essas variáveis satisfazem as seguintes equações:

$$\begin{aligned} y_{nl}(t) &\geq y_{nl}(t-1), & t = t_n(0)+2, & \dots, t_n(l)-1, \\ y_{nl}(t) &\in \{0,1\}, & t = t_n(0)+1, & \dots, t_n(l) - 1. \end{aligned}$$

Para refletir o esgotamento dinâmico do navio de carga contendo o carregamento ℓ , o navio é modelado como um reservatório, usando variáveis de controle $s_{nl}(t)$ e $u_{nl}^0(t)$, representando respectivamente o gás ainda disponível no navio no fim do período t , e o gás retirado do navio e injetado nos gasodutos no momento t . Essas variáveis são não negativas e satisfazem as seguintes relações:

$$\begin{aligned}
 s_{nl}(t) &= Q_{nl} (1 - y_{nl}(t)) && \text{se } t = t_n(l) - 1, \\
 s_{nl}(t) &= s_{nl}(t - 1) + u_{nl}^0(t) && \text{se } t = t_n(l), \dots, T.
 \end{aligned}$$

Onde Q_{nl} representa a quantidade de gas contida na carga ℓ do contrato n .

Cada carregamento de LNG envolve custos de cancelamento, compra e encaixe no porto. Mais precisamente, antes que o carregamento seja entregue, isto e, para qualquer $t = t_n(0) + 1, \dots, t_n(l) - 1$, pode haver um cancelamento com um custo, dado por:

$$\begin{aligned}
 C_{nl}^t &= y_{nl}(t) f_{nl}(t) && \text{se } t = t_n(0) + 1, \\
 C_{nl}^t &= (y_{nl}(t) - y_{nl}(t - 1)) f_{nl}(t) && \text{se } t = t_n(0) + 2, \dots, t_n(l) - 1.
 \end{aligned}$$

A multa é paga no momento t , quando o carregamento ℓ do contrato n é cancelado nesse mesmo momento. Quando $t = t_n(l)$, a carga é entregue e envolve um custo de compra. A partir desta data de entrega, também é considerado o custo de armazenamento do navio. Matematicamente, isso quer dizer que:

$$C_{nl}^t = p_n(t) Q_{nl} (1 - y_{nl}(t - 1)) + \alpha_{nl} s_{nl}(t) \quad \text{se } t = t_n(l),$$

onde α_{nl} é o custo de armazenamento por unidade. O preço por unidade de gás contratada é incerta, dependendo da data de entrega da carga. Finalmente para períodos posteriores a data de entrega das cargas, o custo é determinado por:

$$C_{nl}^t = \alpha_{nl} s_{nl}(t) \quad \text{se } t = t_n(l) + 1, \dots, T.$$

3.2 Armazenamento Dinâmico.

O gás pode ser armazenado em três tipos de reservatórios: navios disponíveis no início do período de otimização, o estoque de energia alternativa e o gasoduto equivalente. As equações

de estado para a fonte alternativa de energia e para os navios disponíveis no início do período de otimização são dadas por:

$$S_{Vi}(t) = S_{Vi}(t-1) - u_{Vi}^0(t) \quad \text{para } t = 1, \dots, T,$$

$$S_A(t) = S_{Ai}(t-1) - \sum_{i=1}^4 u_A^i(t) + u_A^0(t) \quad \text{para } t = 1, \dots, T.$$

A variável $S_{Vi}(t)$ é o nível de armazenamento no i -ésimo navio, dentre os N_v navios, no final do tempo t e $u_{Vi}^0(t)$ é o gás retirado do navio i e injetado no gasoduto. Do mesmo modo, $S_A(t)$ é a energia alternativa disponível no final do tempo t , $u_A^0(t)$ é a energia alternativa comprada, e para $i = 1, \dots, 4$, $u_A^i(t)$ é a energia alternativa fornecida aos clientes do segmento i , com a conversão de $u_A^i = 0$ para $i = 2, 3, 4$, pois somente os clientes do tipo 1 aceitam energia alternativa para cumprir sua demanda.

Por último, a equação de transição da variável de estado $S_p(t)$ (volume do gasoduto no início do tempo t) do gasoduto, é dada por:

$$S_p(t) = S_p(t-1) - \sum_{i=1}^4 u_p^i(t) + u_p^0(t) + \sum_{\{(nl)|t_n(l) \leq t\}} u_{nl}^0(t) + \sum_{i=1}^{N_v} u_{Vi}^0(t).$$

As restrições de fluxo do gasoduto são:

- $u_p^0(t) = Q(t)$,
- $Flow_{min}^1(t) \leq u_p^0(t) + \sum_{\{(nl)|t_n(l) \leq t\}} u_{nl}^0(t) + \sum_{i=1}^{N_v} u_{Vi}^0(t)$,
- $Flow_{max}^1(t) \geq u_p^0(t) + \sum_{\{(nl)|t_n(l) \leq t\}} u_{nl}^0(t) + \sum_{i=1}^{N_v} u_{Vi}^0(t)$,
- $Flow_{min}^2(t) \leq \sum_{i=1}^4 u_p^i(t) \leq Flow_{max}^2(t)$,
- $\sum_{i=1}^{N_v} u_{Vi}^0(t) + \sum_{\{(nl)|t_n(l) \leq t\}} u_{nl}^0(t) \leq Gas_{max}(t)$.

Nas restrições acima, $Q(t)$ é o Gás natural contratado; $u_p^0(t)$ é o Gás Natural contratado injetado no gasoduto; $u_p^i(t)$ para $i=1, \dots, 4$ é o gás entregue aos clientes no segmento i ;

$Flow_{min}^1(t)$ e $Flow_{max}^1(t)$, são os: fluxos mínimo e máximo de entrada respectivamente enquanto $Flow_{min}^2(t)$ e $Flow_{max}^2(t)$ são os: fluxos mínimo e máximo de saída e $Gas_{max}(t)$ é a máxima quantidade de gás que pode ser regaseificada por período. Por ultimo $p_A(t)$ é denotado como o preço da energia alternativa no momento t.

3.3 Satisfações da demanda.

No tempo t, para clientes no segmento i, é denotado por $u_{NS}^i(t)$ a demanda que não é satisfeita; (sendo 0 para $i=1$). Ao mesmo tempo a demanda total de gás de cada tipo de cliente é representada por $D^i(t)$, o custo de venda unitário por $\pi^i(t)$ e o custo unitário por demanda insatisfeita como $\delta^i(t)$. A partir destas variáveis temos a seguinte restrição:

$$u_{NS}^i(t) + u_p^i(t) + u_A^i(t) = D^i(t).$$

Para $i= 1,2,3,4$, e $t= 1, \dots, T$, com $u_{NS}^1(t)= 0$, e com multas e rendas correspondentes à:

$$\delta^i(t) \cdot u_{NS}^i(t) - \pi^i(t) (u_p^i(t) + u_A^i(t)).$$

4. IMPLEMENTAÇÃO E SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

4.1 Dados do problema

As simulações foram realizadas com o objetivo de verificar a sensibilidade dos cancelamentos em relação à variação de diferentes parâmetros. Nível de multas, preço de compra do gás natural, nível das penalidades foram os parâmetros escolhidos para avaliação.

Os parâmetros gerais utilizados nas simulações foram os seguintes:

- Um intervalo de tempo com 24 períodos, sendo que cada período têm a duração de 30.44 dias (correspondendo a um horizonte de dois anos).
- Um nível de conversão de 28.26 metros cúbicos para cada BTU (*British Thermal Unit*)

- Para os três primeiros grupos de clientes a demanda é $D(\text{init}) = (10^6) * (\text{numero de dias num período de tempo}) * [10;2;30]$, respectivamente 10 , 2 e 30 milhões de metros cúbicos de gás natural por dia para os clientes do grupo 1,2 e 3. Como mencionado anteriormente, a demanda é conhecida e não varia ao longo do intervalo tempo estudado.
- Dois contratos, contendo cada um deles 11 cargas.
- A quantidade de gás contida em carga de cada um dos contratos é a mesma, $83 * (10^6) m^3$.
- O preço de venda do gás é 20% do preço a vista do gás.
- O preço de compra da energia alternativa é o dobro do preço a vista do gás.
- Os limites máximos de fluxo de entrada e saída do gasoduto, assim como sua capacidade máxima são considerados valores infinitos. Ao mesmo tempo quantidade de energia alternativa que pode ser trazida a cada intervalo de tempo é considerada infinita.
- Os limites mínimos de fluxo de entrada e saída do gasoduto, assim como sua capacidade máxima são considerados valores nulos.
- Não é possível armazenar energia alternativa e a quantidade de energia deste tipo disponível ao inicio da simulação é zero.
- Vetores contendo as datas de entrega de cada uma das cargas dos contratos assim como datas a partir das quais é possível cancelá-las.
- A quantidade de gás natural não liquefeito que entra no sistema a cada intervalo de tempo é $60 * (\text{numero de dias num período de tempo}) * (10^6) m^3$.
- As penalidades representam duas vezes o preço do gás no dia da entrega.
- Em relação ao valor da carga e o dia do cancelamento, os valores das multas são:
 - 5% para um cancelamento efetuado um mês antes da data de entrega;
 - 2,5% para um cancelamento efetuado dois meses antes da data de entrega;
 - 1% para um cancelamento efetuado três meses antes da data de entrega ou mais.

4.2 Implementação

Após ser estudada a modelagem do problema, apresentado na seção anterior do relatório, foi necessário determinar a linguagem computacional para ela ser implementada, visando o uso de um solver.

O modelo foi implementado em MATLAB usando a livreria de otimização MOSEK <http://mosek.com/e>. MATLAB é uma linguagem e interface que permite resolver tarefas intensas. Foi cogitada a implementação do modelo na linguagem C++, como um adicional a implementação em MATLAB, no entanto por falta de tempo e relativa complexidade do problema, esta opção foi descartada.

O solver escolhido para ser utilizado na nossa modelagem foi o MOSEK. MOSEK é um software designado para resolver problemas de otimização de larga escala. Um atrativo do MOSEK que influi na escolha do solver é o fato de ele possuir uma interface específica para a linguagem MATLAB. Após serem introduzidos os dados no programa, o MATLAB os arruma em uma matriz para depois chamar o MOSEK, o qual processa e entrega a solução a solução do problema.

4.3 Simulações numéricas em um contexto determinístico.

As simulações foram realizadas num computador regular e o tempo que a máquina precisou para encontrar as soluções ótimas variou. Em alguns casos a resposta foi obtida praticamente de maneira imediata, enquanto em outros foram precisos alguns minutos para a solução ser obtida. Ao mesmo tempo em diversas ocasiões foi preciso repetir algumas simulações para obter a solução ótima, pois apesar de ser preciso na maioria das simulações, algumas vezes o MOSEK encontrava soluções sub-ótimas.

A seguir são apresentados os resultados das simulações.

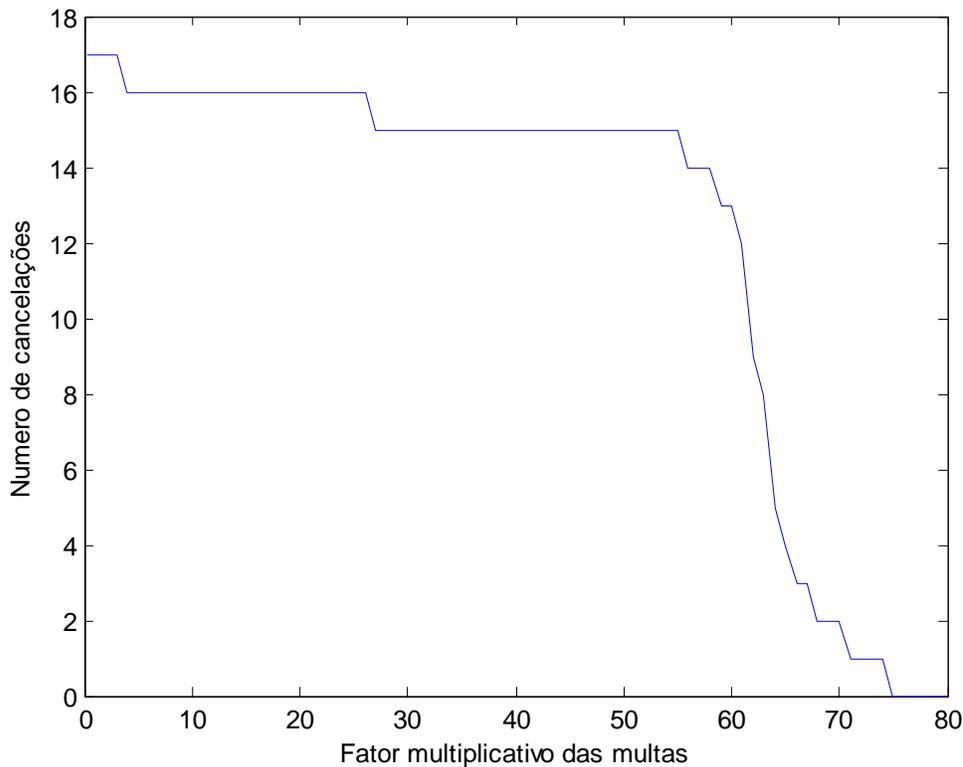


Fig. 2-Número de cancelamentos X nível das multas

A figura 2 mostra o numero de cargas canceladas em relação ao nível das multas relativas ao cancelamento das mesmas. As multas iniciais foram multiplicadas por 0.25, 0.50, 0.75 e 1 e por uma função $(2+4x, \text{ com } x=0 \dots 80)$. A partir do gráfico podemos observar um comportamento natural; enquanto maiores as multas, menor o numero de cargas canceladas. Quando o nível das multas é baixo, especificamente nos primeiros casos, somente 5 cargas são entregues e 17 são canceladas. As cargas entregues são suficientes para satisfazer a demanda. Quando o nível das multas é muito grande é mais interessante comprar todas as cargas, mesmo que não sejam utilizadas imediatamente, pois os custos de cancelar as cargas são muito maiores que seus custos de compra. É importante ressaltar que multas de grande magnitude foram consideradas somente para testar a coerência da lógica dos cancelamentos, tal nível de multas nunca seria utilizado na pratica.

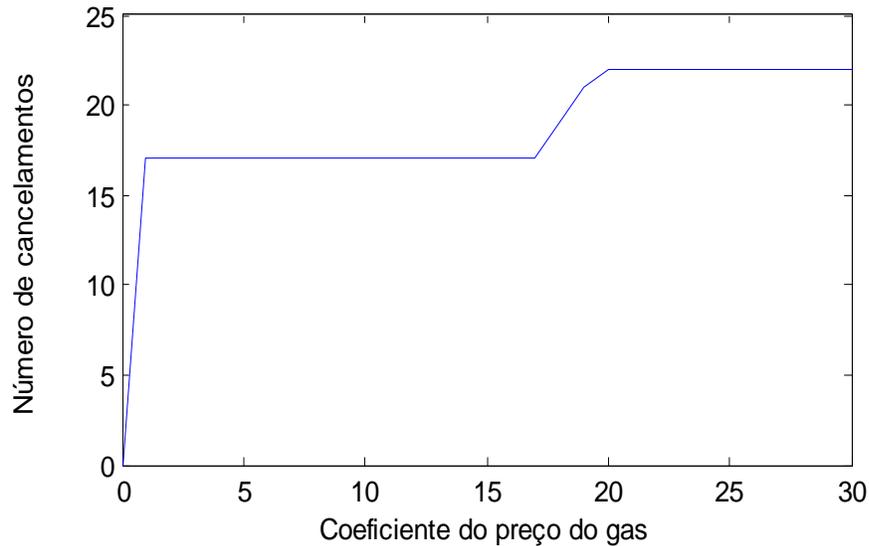


Fig. 3- Número de cancelamentos X preço do gás

A figura 3 mostra a sensibilidade dos cancelamentos em relação ao preço de compra do gás. Para a simulação o preço original do gás natural em cada um dos períodos foi multiplicado por valores na faixa de 1.05 a 2.50, em intervalos de 0.05. Foi possível observar o que seria um comportamento lógico, com o aumento do preço do gás, o numero de cancelamento também tende a aumentar. A partir de certo nível de preços de compra do gás todas as cargas são canceladas, o que indicaria que o custo de compra do gás é muito maior que o custo relativo aos cancelamentos.

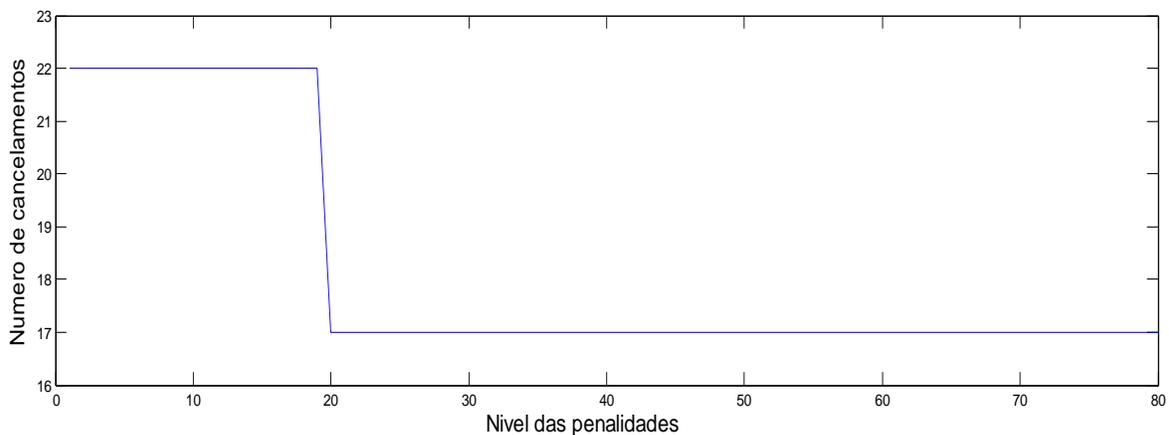


Fig. 4 - Número de cancelamentos X nível das penalidades.

Na figura 4 é possível observar os cancelamentos em relação ao nível das penalidades pagas por deixar a demanda insatisfeita. As penalidades variam em $0.05(x-1)$ vezes o nível original, para $x=1, \dots, 71$. Como esperado abaixo de certo nível das penalidades, todas as cargas são canceladas, pois o custo de compra do gás excede o custo das penalidades. Acima deste nível, uma vez que as cargas necessárias para satisfazer a demanda máxima chegam o nível das penalidades não influi mais na política de cancelamentos.

.4 Simulações em um contexto estocástico.

Consideramos agora que a demanda é uma variável aleatória de distribuição normal, com média aos valores indicados na sessão 4.1, com um desvio padrão de 10% destes valores. Amostramos 80 cenários de demanda. Para cada cenário, usamos o modelo determinístico desenvolvido anteriormente para determinar o custo ótimo. Este experimento nos permite fazer uma análise de sensibilidade do problema de gerenciamento dos contratos com opção de cancelamento quando a demanda varia. A distribuição empírica correspondente encontra-se na figura 5, onde observamos que esta distribuição não é simétrica. Para um estudo mais detalhado do problema no contexto estocástico, usando uma metodologia robusta, o leitor pode se referir à [3].

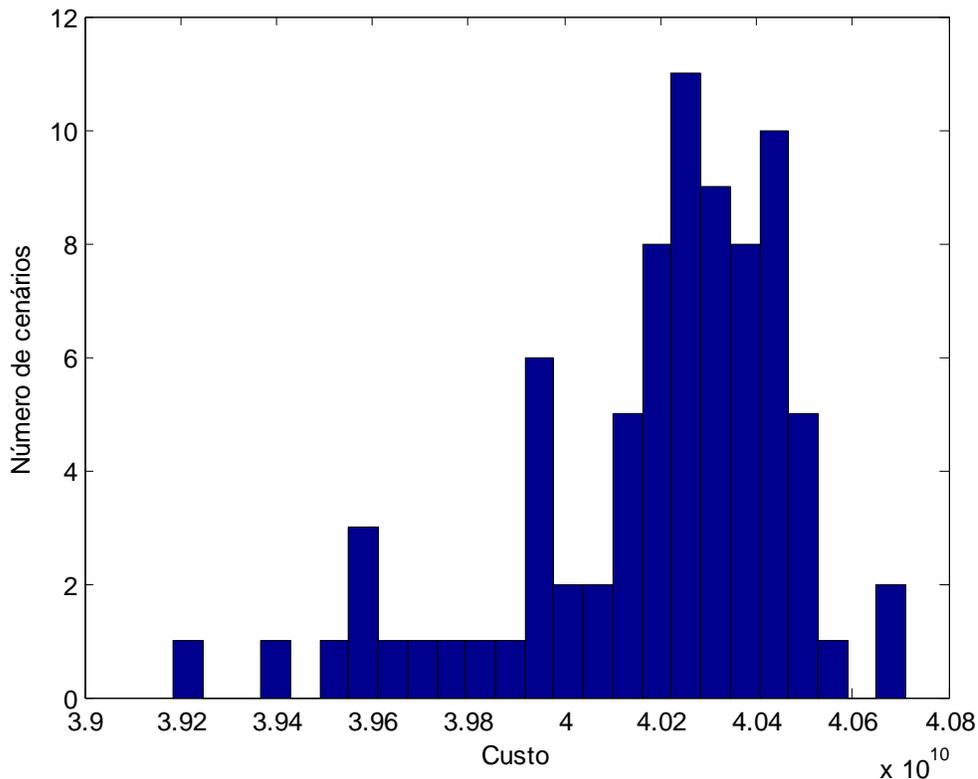


Fig 5-Distribuição empírica dos custos com um desvio-padrão de 10% o valor da demanda inicial

Por último na figura 5 foi representada a distribuição dos custos num grupo de 80 cenários como uma distribuição normal.

- **CONCLUSÃO**

O estudo nos deu a oportunidade de modelar e implementar com um software comercial um problema de gerenciamento de contratos com opção de cancelamento. Cabe ressaltar que este problema corresponde a uma situação do mundo real. Mais especificamente, ele foi proposto por uma grande empresa do ramo energético. Além disso, os dados e os detalhes seguem as especificações do problema.

Verificamos a coerência da modelagem e da implementação rodando simulações em contextos determinísticos e estocásticos.

- **BIBLIOGRAFIA**

- [1] Guigues Vincent, Sagastizábal Claudia e Zubelli Jorge P. Robust Management and Pricing of LNG Contracts with Cancellations Options, submetido à Operations Research, 2010.
- [2] Abadie Luis. M. e Chamorro José M. Monte Carlo valuation of natural gas investments, *Review of Financial Economics*, 18(1):10-22, 2009.
- [3] Ben-Tal Aharon e Nemirovski Arkadi. Robust Convex Optimization. *Mathematics of Operations Research*, 23(4):769-805, 1998.
- [4] Guigues Vincent e Sagastizábal Claudia. Risk-averse feasible policies for stochastic linear programming. Disponível em http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2009/02/2215.html, 2009.
- [5] Lai Guoming e Margot François e Secomandi, Nicola. An approximate dynamic programming approach to benchmark practice-based heuristics for natural gas storage valuation, *Operations Research*, 58:564-582,2010.
- [6] Haurie Alain e Smeers Yves e Zaccour Georges. Models for Energy Policy, capítulo Gas contract Portfolio Management: Experiments with a Stochastic Programming Approach, páginas 521-528, Lesourd, J-B and Percebois, J. and Valette, F., 1995 .