

9 REFERÊNCIAS

- [1] A.C.G. Melo, M.S. Reis, B.G. Gorenstin, A.M. Oliveira, M.E. Maceira, “Risk Analysis in the Electrical Sector Investment Projects”. SEPOPE, Salvador, 1998
- [2] A.R.Guimarães, “Estratégias de contratação de distribuidoras em leilões de energia elétrica considerando incerteza na demanda”, Dissertação de MSc., PUC-Rio, Abril 2006
- [3] A.K.Dixit and R.S.Pindyck, Investment Under Uncertainty, Princeton University Press, 1994
- [4] Azevedo, E. M. (2004). Modelo computacional de teoria dos jogos aplicado aos leilões brasileiros de energia elétrica. Tese de doutorado, Unicamp, Campinas - Brasil.
- [5] Barroso, L.A.; Flach, B.; Kelman, R.; Bezerra, B.; Binato, S.; Bressane, J.M.; Pereira, M.V.; “Integrated gas-electricity adequacy planning in Brazil: technical and economical aspects” Proceedings of the IEEE PES General Meeting, 2005.
- [6] B.G.Gorenstin, N.M.Campodónico, J.P.Costa, M.V.F.Pereira, “Stochastic Optimization of a Hydro-thermal System Including Network Constraints”, IEEE Trans. on PAS, Vol 7, No.2, May 1992.
- [7] A.M. Duarte Jr., M.L.A. Maia, “Optimal Portfolios with Derivatives”, *Derivatives Quarterly*, Volume 4, Number 2, 1997
- [8] B.Mo, A.Gjelsvik, A.Grundt, “Integrated Risk Management of Hydro Power Scheduling and Contract Management”, presented at the 1999 IEEE Winter Power Meeting
- [9] D. Bertsimas, J.N. Tsitsiklis, “Introduction to Linear Optimization”, Athena Scientific, 1997
- [10] D.Luemberger, *Investment Science*, Oxford, 1998

- [11] D. Wolf and Y. Smeers. "The gas transmission problem solved by an extension of the simplex algorithm", *Management Science*, vol 46, no. 11, pp. 1454-1465, Novembro, 2000
- [12] Decreto Presidencial 5.163, de 30 de Julho de 2004
- [13] Dekrajangpetch, S. e G. B. Sheble (2000). Structures and formulations for electric power auctions. *Electric Power Systems Research* 54, 159-167
- [14] ECLAC, Seminar "Instruments to stimulate investment and guarantee energy security in the Southern Cone countries", October 2004
- [15] EPRI, Forward Price Forecasting for Power Market Valuation: Excerpts Introducing Valuation and Forecasting Approaches, EPRI, Palo Alto, CA: 1999. TR-111860-R1
- [16] E.Faria, "Alocação de Energia Firme em Sistemas Hidrotérmicos: uma abordagem por jogos cooperativos", Dissertação MSc, PUC-Rio, Maio 2004
- [17] H.M. Markowitz, "Portfolio Selection", *Journal of Finance*, 7, 1952
- [18] H.M. Markowitz, *Portfolio Selection: Efficient Diversification of Investment*. New York: John Wiley & Sons, 1959
- [19] IEA – South American Gas – Daring to tap the bounty, IEA Press, 2003
- [20] IEA – Competition in Electricity Spot Markets, , IEA Press, 2002
- [21] J.Birge, F.Louveau, *Introduction to Stochastic Programming*, Springer, 1997
- [22] J.C. Hull, *Options, Futures and Other Derivative Securities*, Prentice Hall, NJ, 1999
- [23] J. Munoz, N.J. Redondo, J.P. Ruiz, "Natural gas network modeling for power systems reliability studies", IEEE PES-Summer Meeting, Julho, 2002
- [24] Klemperer, P. (1999). Auction theory: A guide to the literature. *Journal of economic surveys* 13 (3), 227-286.
- [25] L.A.M. Fortunato, T.A.A. Neto, J.C.R. Albuquerque, M.V.F. Pereira, *Introdução ao Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de*

- Produção de Energia Elétrica, ELETROBRÁS/Editora Universitária da UFF, 1990
- [26] L.A.Barroso, J. Trinkenreich, S. Granville, P. Lino, M.V. Pereira, “Avaliação de estratégias de redução de risco hidrológico para empresas com portfólios predominantemente hidroelétricos” – XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Uberlândia, 2003.
- [27] L. Maurer, M. Pereira, J.Rosenblatt, “Implementing Power Rationing in a Sensible Way: Lessons Learned and International Best Practices”, Energy and Mining Sector Board Discussion Paper, The World Bank Group, 2004.
- [28] M.A.Tavares, “Gás Natural no Cone Sul – O Desafio da Integração”, I Seminário Nacional – Petróleo e Gás no Brasil, Valor e FGV, Abril 2005.
- [29] M.A.Tavares, “Marco Regulatório Brasileiro para Indústria do Gás”, Março 2006 – disponível em www.gasenergy.com.br.
- [30] M.V.F. Pereira, et al., “Methods and Tools for Contracting in a Competitive Framework”, CIGRÉ Task Force 38-05-09, Dezembro 2000
- [31] M.V.Pereira, L.A.Barroso, J.Rosenblatt, “Supply Adequacy in the Brazilian Power Market”, Proceeding of the IEEE General Meeting 2004, Denver.
- [32] M.V.Pereira, N. Campodónico, R. Kelman, – Long term Hydro Scheduling based on Stochastic Models, EPSOM '98, Zurique, Setembro 1998.
- [33] M.V.Pereira, M.; L.M.Pinto– Multi-Stage Stochastic Optimization Applied to Energy Planning, Mathematical Programming, Vol 52, 359-375, 1991
- [34] Masili, G. S. (2004). Metodologia e software para simulação de leilões de energia elétrica do mercado brasileiro. Dissertação de mestrado, Unicamp, Campinas - Brasil.
- [35] M.R. Young, “A Minimax Portfolio Selection Rule with Linear Programming Solution”, Management Science, 44, 673-68.
- [36] N.A.Chris, Black-Scholes and Beyond: Option Pricing Models, McGraw-Hill, 1997
- [37] N.Flatabo, A.Haugstad, B.Mo, “Short-term and Medium-Term Generation Scheduling in the Norwegian Power System under a Competitive Power

- Market Structure”, EPSOM’98 Proceedings, Zurich, September 23-25, 1998
- [38] O.D. Mello, T. Ohishi, “Natural Gas Transmission for Thermoelectric Generation Problem”, IX Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Maio, 2004
- [39] Oren S., "Ensuring Generation Adequacy in Competitive Electricity Markets", Ch. 10 in *Electricity Deregulation: Choices and Challenges*, Griffin, M. James and S. L. Puller (eds), Univ. Chicago Press, June 2005.
- [40] Oren S.S., 2000."Capacity Payments and Supply Adequacy in Competitive Electricity Markets”, Proceedings of the VII Symposium of Specialists in Electric Operations and Expansion Planning , Curitiba, Brazil
- [41] Oren S., “Generation Adequacy via Call Options Obligations: Safe Passage to the Promised Land”, 16, UCEI Energy Policy and Economics, September 2005.
- [42] P.Boyle, M.Broadie, P. Glasserman, “Monte Carlo Methods for Security Pricing”, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 1977
- [43] P. Jorion, *Value at Risk – The New Benchmark for Controlling Market Risk*. McGraw-Hill, 1997
- [44] P. A. M-S. David, L.A.Barroso, S.Granville, A.V.Filho “Contratação e aversão a risco no despacho competitivo da geração” - XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Uberlândia, 2003
- [45] P.Fusaro, *Energy Risk Management: Hedging Strategies and Instruments for the International Energy Market*, McGraw-Hill, 1998
- [46] PRATT, J. “Risk Aversion in the Small and in the Large”, *Econometrica*, v.32, n.1-2, pp.122-130
- [47] Portaria MME 303/2004 – disponível em <http://www.mme.gov.br>
- [48] R.Dembo, “Mark to Future: A consistent Firm-Wide Paradigm for Measuring Risk and Return”, in *Risk Management and Analysis, Volume 1: Measuring and Modelling Financial Risk*, John Wiley&Sons, 1998

- [49] R.R. Mercado, “Natural Gas Pipeline Optimization”, Handbook of Applied Optimization, Edited by P. M. Pardalos and M. G. C. Resende, Oxford university Press, 2002
- [50] Rudnick, H.; Barroso, L.A.; Skerk, C.; Blanco, A., “South American reform lessons - twenty years of restructuring and reform in Argentina, Brazil, and Chile”, IEEE Power and Energy Magazine, Vol 3, 2005
- [51] Street, A.; Barroso, L.A.; Cahuano, J.; Granville, S.; Rosenblatt, J.; Thomé, L.; Pereira, M.V.; Kelman, R.; Faria, E.; Veiga, A.; “Estratégias de Atuação de Agentes Geradores sob Incerteza em Leilões de Contratos de Energia Elétrica”, XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, 2005.
- [52] S. Granville, G.C. Oliveira, L.M Thomé, N. Campodónico, M. Latorre, M.V.Pereira, e L.A. Barroso , “Stochastic optimization of transmission constrained and large scale Hydrothermal Systems in a Competitive Framework”, Proceedings of the IEEE General Meeting, Toronto, 2003.
- [53] S.Granville, R.Kelman,L.A.Barroso, R.Chabar, M.V. Pereira, P. Lino, P. Xavier, I. Capanema , “Um Sistema Integrado para Gerenciamento de Riscos em Mercados de Energia Elétrica”, XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Uberlândia, 2003
- [54] S.Fleten, S.Wallace, W.Ziemba, “Portfolio Management in a Deregulated Hydropower Based Electricity Market”, Hydropower’97 Proceedings, Trondheim, August 1997
- [55] S.Hunt, G.Shuttleworth, Competition and Choice in Electricity, Wiley, 1996
- [56] Silva, A. J. (2003). Leilões de certificado de energia elétrica: Maximo excedente versus maxima quantidade negociada. Dissertação de mestrado, Unicamp, Campinas - Brasil.
- [57] Vazquez C., River M. and Arriaga I.P., 2002. “A market approach to long-term security of supply”, IEEE Transactions on Power Systems, 17 (2)

- [58] Von Der Fehr, N.H., Harbord, D., Competition in Electricity Spot Markets Economic Theory and International Experience, Memorandum, Departmente of Economics, University of Oslo, 1998.
- [59] W.V. Harlow, “Asset Allocation in a Downside-Risk Framework”, Financial Analysis Journal, 1991
- [60] W.F. Sharpe, “Capital Asset Prices: A Theory of Market Equilibrium Under Conditions of Risk”, *Journal of Finance* 19, 1964
- [61] X.Vieira F., M.V.F. Pereira, B.G. Gorenstin, J.C.O. Mello, A.C.G. Melo, S. Granville, “Playing the Odds: Risk Management in Competitive Generation Contracts” Paper presented at the Paris CIGRÉ Conference, 1998

10 ANEXO A: Métricas de Risco

Riscos estão normalmente associados a possíveis perdas financeiras ou à possibilidade de não se atingir um nível de remuneração compatível com o investimento. A eliminação total de riscos pode ser economicamente inviável ou mesmo impossível. Por outro lado, situações de risco podem oferecer grandes oportunidades de ganho. Na área financeira, decisões referentes à alocação de recursos são encaradas em um contexto de risco-retorno, ou seja decisões que envolvem um maior nível de risco só são aceitáveis se proporcionarem maiores retornos.

Não existe um modo universalmente aceito de representar o equilíbrio entre ganho e risco. Discutiremos neste anexo as seguintes abordagens:

- Variância dos retornos (Markowitz)
- “Value at risk”
- “Downside risk”
- Função utilidade.

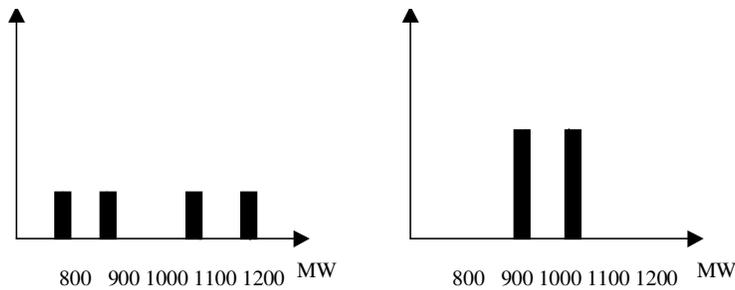
10.1 O Modelo de Otimização de Portfolios de Markowitz

A base da teoria moderna de gerenciamento de portfólios, que tem Harry Markowitz [18] como um dos seus fundadores, é que os investidores podem reduzir seus riscos através da diversificação ou balanceamento de carteiras. Vamos considerar, por exemplo, um investidor com um contrato de venda de energia de 1000 MW médios que tem a opção de construir dois tipos de usinas de 500 MW médios, associadas a um mesmo custo de investimento e operação. Dadas as condições hidrológicas, a geração efetiva das usinas é variável, como mostrado na Tabela 10-1. Os excedentes/déficits de energia podem ser comercializado no mercado spot. A comercialização neste mercado envolve riscos pois o investidor poderá ter que comprar energia a um preço muito mais elevado do que o do seu contrato de venda.

Geração(MW médio)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Usina 1	600	550	450	400
Usina 2	450	400	600	550

Tabela 10-1 – Cenários de geração

Ao formar seu portfólio de geração o investidor pode optar construir duas usinas idênticas do tipo 1 ou 2 (Portfólio A) ou uma usina do tipo 1 e a outra tipo 2 (Portfólio B). A Figura 10-1 mostra a distribuição de geração das duas alternativas.



Portfólio A – Duas Usinas do Tipo 1 ou 2

Portfólio B – Combinação Usinas: Tipo 1 e 2

Figura 10-1 - Distribuição da Geração

Pode-se observar na Figura 10-1 que a geração do Portfólio B é mais concentrada em torno de 1000 MW médios ou seja, como decorrência da diversificação o risco de exposição ao spot do Portfólio B é menor que o do Portfólio A

Seja $\{1, \dots, n\}$ o conjunto de ativos cujos retornos (lucro percentual) são representados por variáveis aleatórias $\{\xi_1, \dots, \xi_n\}$. O problema de seleção estática de portfólio consiste em determinar a proporção de recursos a ser investido em cada ativo de acordo com o perfil de risco do investidor. Nesta abordagem portfólios com maior nível de risco devem oferecer como contrapartida maiores retornos.

Como medida de risco Markowitz adotou no seu trabalho original o desvio padrão dos retornos. Por exemplo, a Figura 10-2 mostra a distribuição de retornos de dois portfólios com o mesmo valor esperado. Neste caso, o portfólio A é mais

atraente pois está associado a um menor desvio padrão de retorno - o risco de se obter um nível de retorno insatisfatório neste portfólio é menor que no portfólio B.

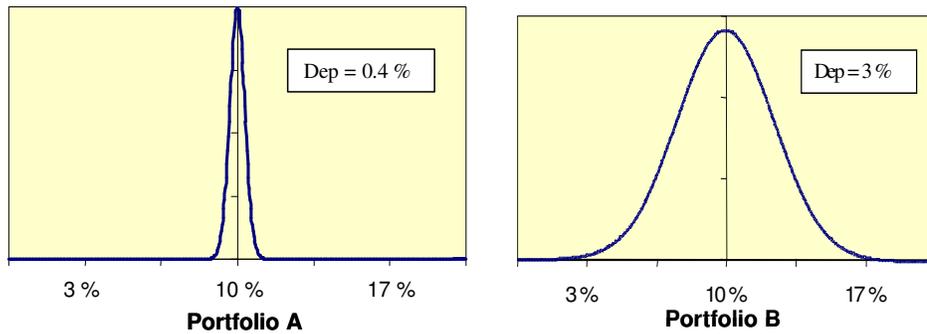


Figura 10-2 - Medida de Risco

Denotando por $\{r_1, \dots, r_n\}$ os valores esperados e $\{v_{ij}, i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n\}$ a matriz de variância-covariância dos retornos dos ativos, então um portfólio formado pela proporção $\{x_1, \dots, x_n\}$ de recursos a ser investido em cada ativo tem como valor esperado do retorno:

$$x_1 r_1 + \dots + x_n r_n \quad (10-1)$$

e variância

$$\sum_{i,j} x_i v_{ij} x_j \quad (10-2)$$

O problema de otimização de portfólios de Markowitz pode ser formulado como:

$$\text{Min } z = \sum_{i,j} x_i v_{ij} x_j \quad (10-3)$$

sujeito a

$$\begin{aligned} x_1 + \dots + x_n &= 1 \\ x_1 r_1 + \dots + x_n r_n &= r \end{aligned}$$

onde r é o retorno esperado especificado para o portfólio. No problema de otimização acima, para cada valor de r é calculado o portfólio de variância mínima cujo valor esperado de retorno é igual a r . A relação desvio padrão do

portfolio de variância mínima \times retorno associado é expressa como uma hipérbole chamada de fronteira de portfolios de variância mínima, e tem um aspecto ilustrado na Figura 10-3.

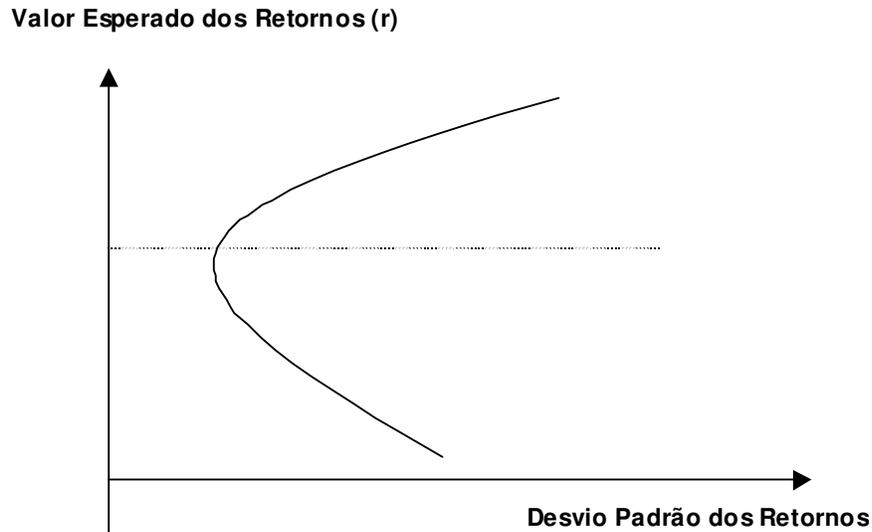


Figura 10-3 – Portfólios de Variância Mínima

Pode-se observar na Figura 10-3 que para cada valor de desvio padrão existem dois valores esperados associados para o retorno do portfólio – um na parte superior da curva e outro na parte inferior. O portfólio de interesse é o que corresponde a parte superior da curva chamada de fronteira eficiente.

A fronteira eficiente expressa quantitativamente o *trade-off* risco \times retorno ao associar um maior retorno para portfólios de maior risco. A escolha de um portfólio específico nesta fronteira é função do perfil de risco do investidor.

Uma propriedade importante do conjunto de soluções do problema é que qualquer combinação convexa de portfólios da fronteira eficiente é um portfólio da fronteira eficiente. Isto implica que se todos investidores se posicionarem na fronteira eficiente o portfólio de mercado (portfólio resultante da agregação dos portfólios de todos investidores) irá pertencer também a esta fronteira.

Uma consequência importante da teoria de Markowitz é o modelo CAPM (“Capital Asset Pricing Model”), proposto por Willian Sharpe [60], que relaciona os retornos de um ativo ou portfólio com os retornos do portfólio de mercado. Para um dado ativo ou portfólio p seja r^p o seu retorno esperado. Então,

$$r^P = r_0 + \beta(r^M - r_0) \quad (10-4)$$

onde

r_0 retorno associado ao ativo livre de risco (caderneta de poupança ou Letras do Tesouro Americano, por exemplo)

β razão entre a covariância dos retornos do ativo ou portfólio com os retornos do portfólio de mercado, e a variância dos retornos do portfólio de mercado

r^M retorno esperado do portfólio de mercado.

De acordo com o modelo CAPM se os retornos de um determinado ativo são positivamente correlacionados com os retornos do portfólio de mercado então seu retorno esperado deverá exceder a taxa livre de risco.

10.2 Value at risk (VaR)

O desvio padrão dos retornos é uma medida atraente de riscos mas seu grande problema é que penaliza igualmente flutuações negativas e positivas dos retornos em torno do seu valor esperado. A distorção introduzida por esta medida é tão mais aguda quando maior for a assimetria da distribuição dos retornos dos ativos como é o caso de opções. Na abordagem VaR, tentamos quantificar o risco analisando a máxima perda ou *pior* ocorrência a um dado nível de probabilidade como ilustrado na Figura 10-4 [43].

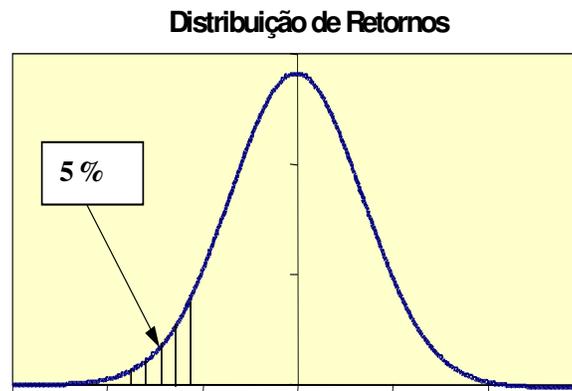


Figura 10-4 – O Conceito de VaR

Considere por exemplo um gerador que tem um contrato no montante de 100 MW médios mensais a um preço de energia de \$ 30 /MWh. O valor do contrato em um determinado mês é igual a:

$$X = q(P-S)$$

onde:

- S valor do preço spot no mês
- Q quantidade de energia contratada no mês (73000MWh)
- P preço de contrato (\$30/MWh)

A variação de valor de contrato é igual a:

$$\Delta X = -q\Delta S$$

Vamos supor que $\Delta S/s$, onde ΔS é a variação mensal do preço spot, tem uma distribuição aproximadamente normal com desvio padrão de 5% .Então,

$$\sigma(\Delta S) \cong s\sigma(\Delta S/s) = 0.05s \quad \text{e} \quad \sigma(\Delta X) = 0.05qS = 73000 \times 0.05 \times s$$

Se em determinado mês o preço spot é igual a \$ 20 / MWh a perda máxima de valor de contrato para o próximo mês a um nível de probabilidade de 5% é igual a:

$$\$1.65 \times 73000 \times 0.05 \times 20 = \$120450$$

10.3 Downside Risk

O “downside risk” [59] penaliza somente os retornos inferiores a um determinado valor (retorno de referência) especificado pelo investidor Este tipo de abordagem é interessante pois com ela o investidor se neutraliza contra baixos retornos sem abrir mão de possíveis ganhos elevados. A Figura 10-5 mostra a distribuição de retornos de dois portfólios.

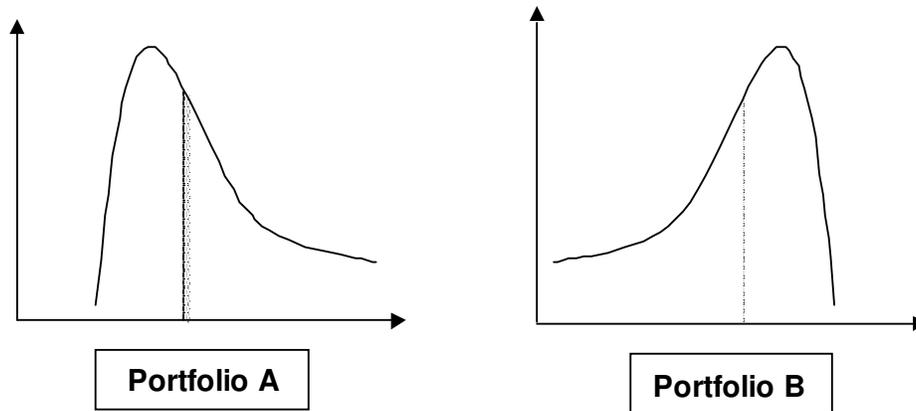


Figura 10-5 – Distribuições de Retorno Assimétricas

O valor esperado e desvio padrão e retornos dos dois são iguais, no entanto o portfólio A é mais atraente pois tem maiores probabilidades de ganhos elevados. Isto é o “downside risk” do portfólio B é maior.

O esquema de otimização de portfólio de Markowitz pode ser estendido de várias maneiras para contemplar o downside risk como medida de risco [7]. Será descrita a seguir uma forma baseada em cenários de realização de retornos.

Para $k = 1, \dots, K$ seja $\{\xi_{1k}, \dots, \xi_{nk}\}$ o vetor de retornos dos ativos $\{1, \dots, n\}$ no cenário k e p_k a probabilidade associada a este cenário. Um portfólio definido pela proporções (x_1, \dots, x_n) do recurso a ser investido em cada ativo tem como retorno no cenário k :

$$x_1 \xi_{1k} + \dots + x_n \xi_{nk} \quad (10-5)$$

A deficiência deste retorno com relação a um retorno de referência η é igual a:

$$\begin{aligned} \eta_k &= \eta - (x_1 \xi_{1k} + \dots + x_n \xi_{nk}); \text{ se } \eta \geq x_1 \xi_{1k} + \dots + x_n \xi_{nk} \\ &= 0 \text{ em caso contrário} \end{aligned} \quad (10-6)$$

O downside risk do portfólio a um retorno de referência η é igual a:

$$\sum_k p_k \eta_k \quad (10-7)$$

O problema de otimização de portfólios sob a ótica de downside risk a um retorno de referência η é então:

$$\text{Max} \quad \sum_k p_k (x_1 \xi_{1k} + \dots + x_n \xi_{nk} - \lambda y_k) \quad (10-8)$$

sujeito a

$$x_1 \xi_{1k} + \dots + x_n \xi_{nk} + y_k \geq \eta, k = 1, \dots, K$$

$$x_1 + \dots + x_n = 1$$

$$y_k \geq 0, k = 1, \dots, K$$

onde λ é o parâmetro de penalidade. No problema (10.8) cada variável y_k fornece uma medida de quanto o retorno do portfolio definido por (x_1, \dots, x_n) é inferior ao retorno de referência η no cenário k . O downside risk do portfolio ótimo pode ser escrito como:

$$\sum_k p_k y_k \tag{10-9}$$

A função objetivo do problema (10.8) é o valor esperado do retorno do portfolio subtraído de uma penalidade λ multiplicada pelo downside risk. Esta penalidade expressa o trade-off entre o valor esperado dos retornos e o downside risk: quanto maior for seu valor menor vai ser o risco associado ao portfolio ótimo.

Após a solução do problema (10.8) para diferentes valores de λ pode-se traçar a fronteira eficiente como ilustrado na Figura 10-6.

Valor Esperado Retorno

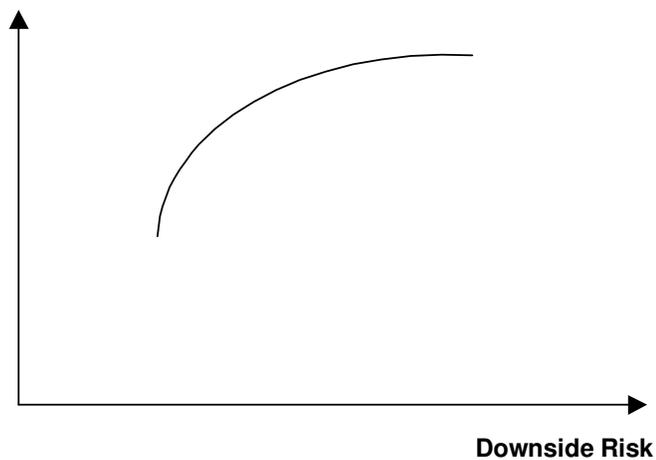


Figura 10-6 – Fronteira Eficiente – Downside Risk

10.4 Funções de Utilidade

10.4.1 Conceito

As funções de utilidade traduzem receitas financeiras em “unidades de utilidade” [9]. Neste caso o objetivo é maximizar a *utilidade esperada*. A modelagem da preferência do investidor com relação a risco x retorno através de funções de utilidade permite uma grande flexibilidade.

Por exemplo, um investidor indiferente a riscos apresentaria uma FU linear, como na Figura 10-7a. Isto significa que um aumento de receita tem o mesmo impacto que uma redução; assim sendo, a utilidade esperada é igual à renda esperada. Um investidor avesso a risco apresentaria uma FU côncava, como se vê na Figura 10-7b. Neste caso, a perda devida a um “mau” resultado não é “compensada” pelo ganho advindo de um “bom” resultado. E, finalmente, um investidor que arrisca teria uma função de utilidade convexa, conforme se vê na Figura 10-7c.

Os vários critérios de risco x retorno apresentados nas seções anteriores podem ser representados através de uma função de utilidade apropriada.

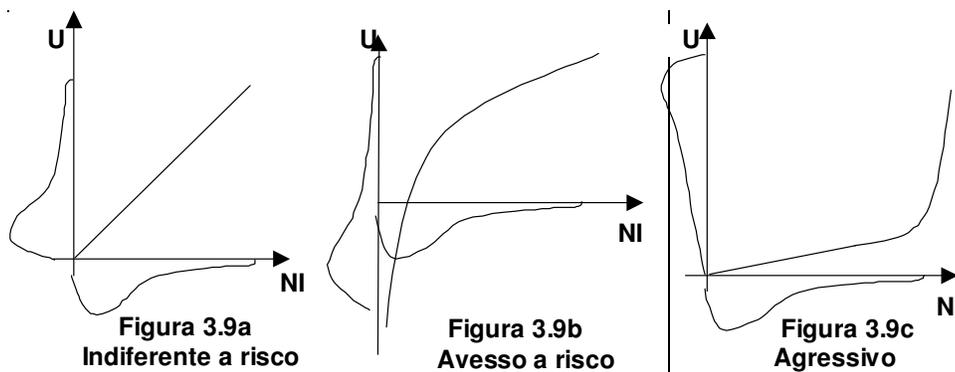


Figura 10-7 – Tipos de Função de Utilidade

10.4.2 O Equivalente à Certeza

Seja R a variável aleatória que representa a receita da usina (em \$); seja $U(R)$ a função de utilidade associada (em unidades de utilidade). A seguir, digamos que EU represente o valor esperado de $U(R)$ sobre todos os possíveis valores de R (em unidades de utilidade). Por fim, calculemos o inverso de EU , $U^{-1}(EU)$ (em \$). Este último valor, conhecido como “equivalente à certeza”, pode ser interpretado como o “valor monetário” do ativo. Em outras palavras, o proprietário da usina seria indiferente (isto é, teria a mesma utilidade) entre receber um pagamento *fixo* de $\$U^{-1}(EU)$ ou receber as receitas estocásticas da venda de energia.

10.4.3 Exemplo

A Figura 10-8 mostra uma possível função de utilidade que possui dois segmentos separados por um ponto dado correspondente a renda de \$ 20.

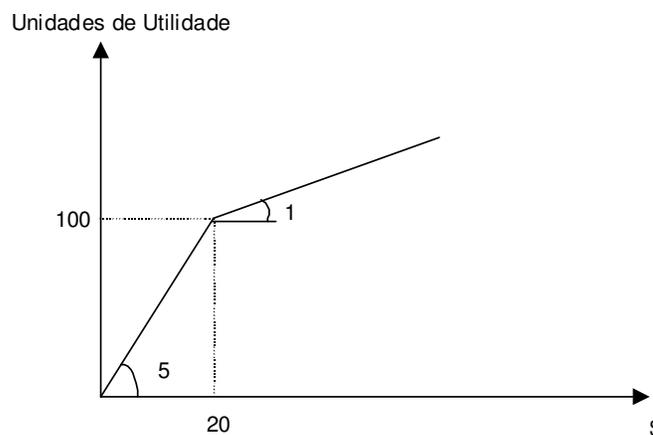


Figura 10-8 – Possível Função Utilidade

Vamos supor que existem quatro cenários para renda com igual probabilidade:

$$R_1 = \$0; R_2 = \$15; R_3 = \$30; R_4 = \$45$$

O valor esperado da renda é então:

$$0.25 \times (0) + 0.25 \times (15) + 0.25 \times (30) + 0.25 \times (45) = \$22.5$$

Por sua vez, a utilidade esperada é:

$$0.25 \times (0) + 0.25 \times (75) + 0.25 \times (110) + 0.25 \times (125) = 77.5$$

O equivalente à certeza deste fluxo de renda é igual a $U^{-1}(77.5) = \$15.5$, o que corresponde a um desconto de 30 % com relação ao valor esperado da renda. Ou seja, dada a dispersão da renda e a aversão a risco do investidor o valor atribuído ao fluxo de caixa é menor que seu valor esperado. Pode-se demonstrar que para investidores indiferentes, aversos ou que têm atração por riscos (funções utilidade linear, côncava e convexa respectivamente) o equivalente a certeza é igual, menor ou maior que o valor esperado da renda, respectivamente.

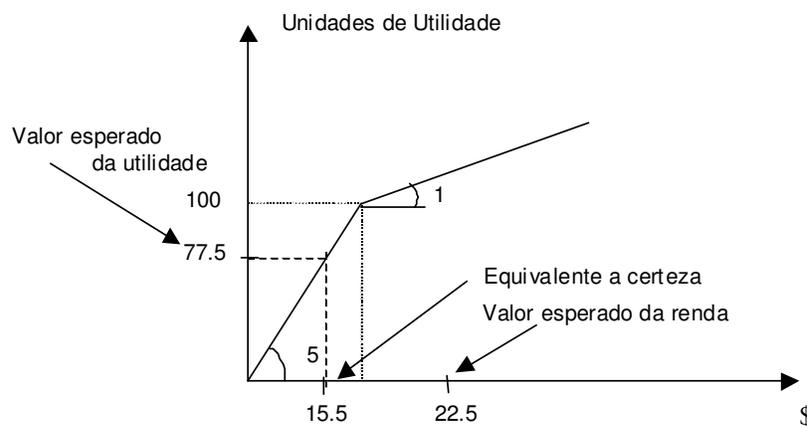


Figura 10-9 – Equivalente a Certeza

11 ANEXO B: Modelo estocástico de despacho do gás – SGAS

O problema do transporte do gás natural tem sido amplamente estudado na literatura [49][11][22][38], consistindo em decidir como escoar o gás na rede de modo a atender diversos pontos de demanda, a uma pressão mínima definida. Uma rede de gás consiste em diversos pontos de oferta onde o gás é injetado, diversos nós de demanda onde o gás é retirado do sistema e outros nós onde o gás é redirecionado. Os gasodutos são representados por arcos entre os nós. Matematicamente falando, uma rede é representada pelo par (V,E) , onde V é o conjunto de nós e E é o conjunto de arcos conectando estes nós.

O gás natural flui através de gasodutos por diferença de pressão entre os nós. A relação entre a vazão e esta diferença de pressão é não linear [11] e a capacidade de cada gasoduto está associada à pressão máxima e mínima de cada nó da rede. Visando aumentar os limites de operação, ou seja, aumentar a diferença de pressão entre os nós, compressores [49] podem ser adicionados a rede. Em gasodutos com compressores o fluxo pode ser maior que a diferença de pressão entre os nós.

Em uma operação de curto prazo típica, um operador de gasoduto deve decidir como o gás natural flui dos produtores para os consumidores através dos gasodutos, a um determinado nível de pressão, de modo a minimizar os custos de compressão e de déficit. Porém, como nesta tese será estudado o comportamento no longo prazo do sistema (15 anos), por simplificação, as equações não lineares supramencionadas não serão representadas, sendo substituídas por um modelo linear de fluxo em redes. A seguir será discutido o modelo.

11.1 O modelo SGAS

A Figura 11-1 apresenta o fluxo de dados do modelo SGAS. A área hachurada corresponde ao despacho estocástico hidrotérmico do sistema elétrico,

realizado para uma configuração de oferta e demanda pré-estabelecida. O resultado de interesse nesta etapa é a geração elétrica (GWh) das térmicas a gás natural para cada série hidrológica e etapa da simulação (usualmente um mês). A partir destes resultados e usando a taxas de eficiência de cada máquina, é possível obter as projeções de gás natural por usina. A área superior representa o despacho do setor de gás considerando, além dos cenários de gás por térmica, uma projeção do consumo não-termelétrico (distribuidoras e refinarias) e representação da rede de gasodutos. Dado a representação do setor de gás e o consumo de gás para as termelétricas, o modelo SGAS minimiza o déficit de consumo de acordo com algum critério de prioridade para cada setor.

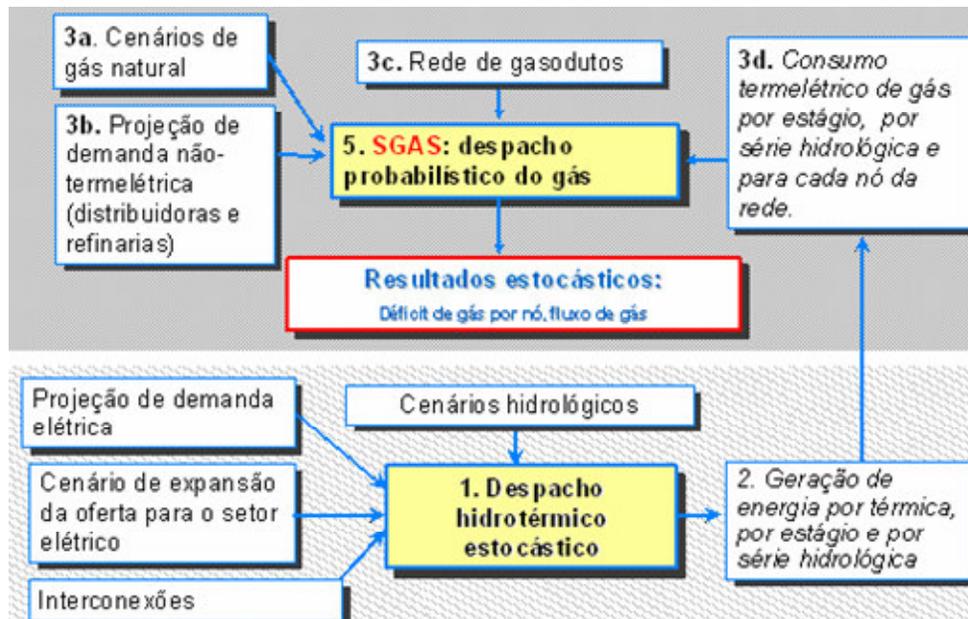


Figura 11-1 – Fluxo de dados do SGAS

O problema pode ser representado por um modelo de fluxo em redes conforme ilustrado no grafo da Figura 11-2.

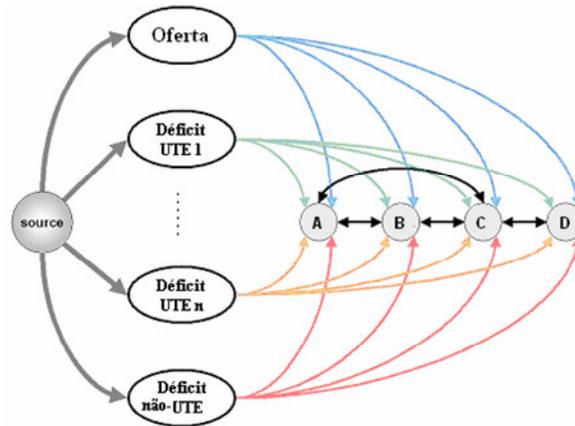


Figura 11-2 – Grafo representando rede de gasodutos

Podem ser identificados três tipos de nós neste grafo: (a) Source, (b) Produção, déficit termoelétrico e déficit não termoelétrico²¹; e (c) Regions A, B, C e D. Os nós das classes (a) e (b) são auxiliares, utilizados para representar a prioridade do atendimento às classes de demanda. O nó (c) representa as regiões de produção e consumo.

Da mesma forma é possível identificar três tipos de arcos neste grafo: os arcos conectando o nó “source” aos nós da classe (b); os nós conectando as classes (b) às classes (c); e os nós conectando as regiões entre si.

O modelo de otimização do despacho do gás é resolvido para cada série hidrológica e cada etapa, sendo formulado como:

$$\text{Min } \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ij} \quad (11-1)$$

Subject to :

$$\sum_{j \in V} x_{ji} - \sum_{j \in V} x_{ij} = b_i \quad \forall i \in V \quad (a)$$

$$x_{ij} \leq u_{ij} \quad \forall (i, j) \in E \quad (b)$$

Onde:

²¹ Demanda de gás dos setores residencial, comercial, industrial, cogeração e automotivo (GNV).

V	Conjunto de nós do grafo
E	Conjunto de arcos do grafo
c_{ij}	Custo de transportar uma unidade de fluxo no arco (i,j) (R\$/MMm ³ /dia)
x_{ij}	Fluxo no arco (i,j) (MMm ³ /dia)
b_i	Balanco oferta e demanda no nó i (MMm ³ /dia)
u_{ij}	Fluxo máximo no arco (i,j) (MMm ³ /dia)

A restrição (11-1) (a) é conhecida como equação de conservação do fluxo. Admiti-se que a diferença entre o fluxo que entra e o fluxo que sai de um nó é igual ao balanço oferta/demanda. A constante b_i será negativa quando representar uma demanda e positiva quando representar uma oferta. A restrição (11-1) (b) impõe um limite no fluxo de cada arco (i,j) .

Cada nó da classe (c) possui uma constante b_i igual a demanda total de gás da região (soma da demanda termoelétrica e da demanda não termoelétrica). A oferta disponível em cada região é representada por arcos conectando-as ao nó “Oferta”, cuja capacidade é igual à oferta local da região.

Com relação a priorização do gás em uma situação de escassez, foi utilizada uma premissa as térmicas são atendidas visando maximizar a geração elétrica. Essa modelagem é obtida colocando mais altos nos arcos que ligam o nó “Source” ao nó déficit das térmicas mais eficientes. Além disso, o setor não-termoelétrico é o primeiro a ser atendido, ou seja, o arco que conecta o nó “Source” ao nó “Demanda não-UTE” apresenta o maior custo.

A ideia é determinar o fluxo na rede que minimiza custo de déficit total.