

7

Resultados

O modelo de programação estocástica e de programação robusta desenvolvidos foram utilizados em um estudo sobre a cadeia integrada de petróleo brasileira. Neste capítulo será apresentada uma breve descrição sobre o caso analisado, informações relevantes sobre os dados utilizados na geração de cenários, o desempenho computacional dos modelos e uma análise de resultados obtidos com os modelos de otimização estocástica e robusta.

7.1

Descrição do Caso Estudado

Um estudo considerando dados reais serviu como base para avaliar o desempenho dos modelos propostos na otimização de um problema de grande porte. O problema estudado considera como fonte de suprimento das refinarias quatorze grupos de petróleos nacionais produzidos em oito campos, dois grupos de petróleos estrangeiros, o gás natural e o óleo vegetal. As refinarias processam cinquenta produtos intermediários, destinados à produção de dez derivados de petróleo associados à demanda nacional. O parque de refino é composto por dezessete refinarias e três centrais de matérias-primas petroquímicas também produtoras de derivados em operação no Brasil. A demanda nacional foi dividida por região (Norte, Nordeste, Centro Oeste-Sudeste, Sul) e distribuída em quatro centros localizados no território brasileiro.

Os nove terminais nacionais considerados têm a função de receber e expedir petróleos e derivados. O terminal internacional localizado na costa dos Estados Unidos representa o ponto de demanda de petróleo nacional, ou seja, é o nó internacional para o qual são enviadas as exportações de petróleo. Os terminais localizados na Arábia Saudita e Nigéria representam pontos de oferta de petróleos

estrangeiros. Foi incluindo ainda na modelagem do problema um terminal internacional genérico que representa a demanda e oferta de derivados a serem exportados e importados pelo Brasil. Atualmente o Brasil comercializa derivados com todos os continentes e não foram obtidos dados suficientes para representar essas demandas e ofertas de forma discriminada. A movimentação desses produtos pela rede logística pode ser feito através de 278 arcos de transportes relativos aos modais rodoviário, aquaviário, dutoviário e ferroviário. O horizonte de tempo analisado é de dez anos.

A ilustração a seguir mostra a localização dos nós que compõe a cadeia integrada de petróleo no Brasil identificados pela legenda.



Figura 0.1: Localização de nós no Brasil.

7.1.1

Levantamento de Dados

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos no Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE, 2007) divulgado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e na dissertação de Carneiro (2008).

7.1.2

Parâmetros Associados à Incerteza

Este trabalho considera três fontes de incerteza: oferta de óleo bruto nacional, demanda nacional por derivados e preços de mercado para derivados e petróleo. Não faz parte do escopo deste trabalho desenvolver uma metodologia para geração de cenários. A abordagem utilizada para geração de cenários foi proposta por Carneiro (2008), onde foram definidos três possíveis realizações para cada um dos parâmetros com incertezas associadas. A partir da combinação destes parâmetros estocásticos foram definidos 27 cenários.

Produção de Petróleo Nacional

As três possíveis realizações de produção de petróleo nacional são representadas pelos seguintes cenários: “leve”, “médio” e “pesado”. Os dados associados ao cenário “médio” referente produção anual média de petróleo nacional foi obtida no PDE (2007) e foi utilizado como cenário base. O cenário “leve” considera um aumento de 5% na oferta de petróleos leves e uma queda de 10% na oferta de petróleos pesados. O cenário “pesado” por sua vez considera um aumento de 10% na produção de petróleos pesados e uma queda de 5% na produção de petróleos leves. O Gráfico 7-1 mostra a produção anual em cada um dos cenários propostos.

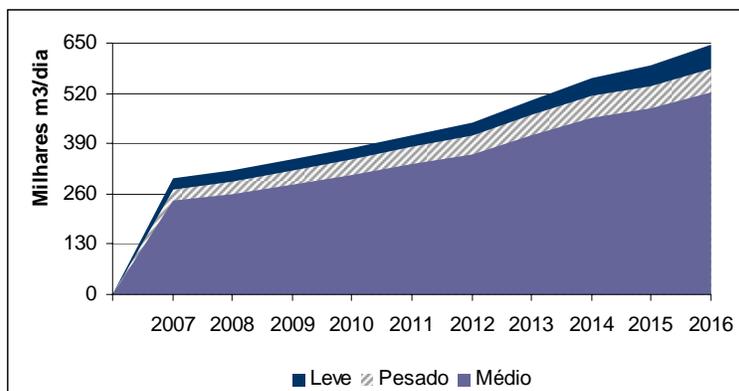


Gráfico 0-1: Produção de Petróleo Nacional.

No Gráfico 7-1 vemos que nos cenários “leve” e “pesado” há um aumento de produção com relação ao cenário “médio”, a diferença está no tipo de petróleo que sofreu a variação.

Demanda Nacional de Derivados

As três possíveis realizações de demanda nacional por derivados são representadas pelos seguintes cenários: “alto”, “médio” e “baixo”. Os dados associados ao cenário “médio”, referentes à demanda anual média de derivados, foram obtidos no PDE (2007) utilizados como cenário base na definição dos demais cenários. O cenário “alto” corresponde a um aumento de 15% na demanda de derivados e o cenário “baixo” corresponde a uma queda de 15% na demanda de derivados. O Gráfico 7-2 ilustra os cenários descritos para o caso da gasolina.

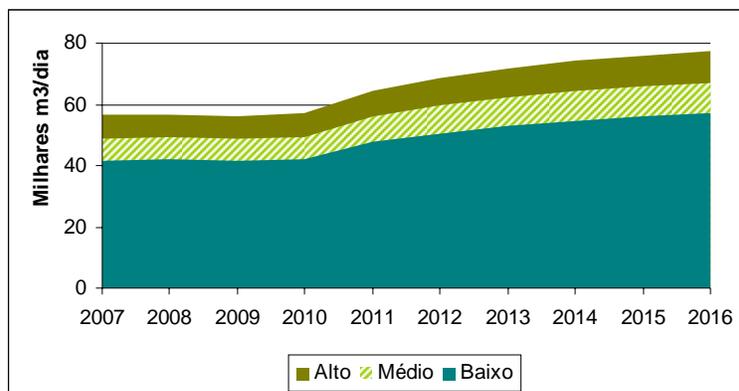


Gráfico 0-2: Demanda Nacional de Gasolina.

Preços de Derivados e Petróleo no Mercado Nacional e Internacional

As três possíveis realizações de preços são representadas pelos seguintes cenários: “otimista”, “conservador” e “pessimista”. Os dados de preço para derivados e petróleo no mercado nacional e internacional foram obtidos segundo metodologia proposta em Carneiro (2008).

7.1.3

Geração de Cenários

Novamente é importante ressaltar que não faz parte do escopo desta dissertação desenvolver uma metodologia para definição de cenários e suas respectivas probabilidades. No entanto é indispensável para a avaliação do modelo matemático proposto a criação de cenários com probabilidades associadas, e para isso, foram arbitradas probabilidades mantendo a coerência com a realidade do problema estudado. Assim, as probabilidades apresentadas nesta seção não possuem nenhum embasamento em processos estocásticos multivariados e servem apenas para testar o modelo matemático.

A Tabela 7.1 mostra a probabilidade de ocorrência de cada possível realização das fontes de incerteza. Este trabalho considerou para cada uma das fontes de incerteza (oferta de óleo bruto nacional, demanda nacional por derivados e preços de

mercado para derivados e petróleo) três possíveis realizações descritas na Seção 7.1.2.

Tabela 0.1: Probabilidade dos parâmetros estocásticos.

Parâmetro Estocástico		Probabilidade
Produção	Leve	25%
	Médio	50%
	Pesado	25%
Demanda	Alta	25%
	Média	50%
	Baixa	25%
Preço	Otimista	25%
	Conservador	50%
	Pessimista	25%

Os cenários analisados neste estudo foram gerados a partir da combinação dos parâmetros estocásticos, totalizando de vinte e sete cenários (3^3). Assumindo que os parâmetros associados à incerteza são variáveis aleatórias independentes, a probabilidade de cada combinação gerada é dada pelo produto entre as probabilidades de ocorrência de cada uma das variáveis aleatórias. Os vinte e sete cenários analisados e suas respectivas probabilidades são mostrados na Figura 7.2.

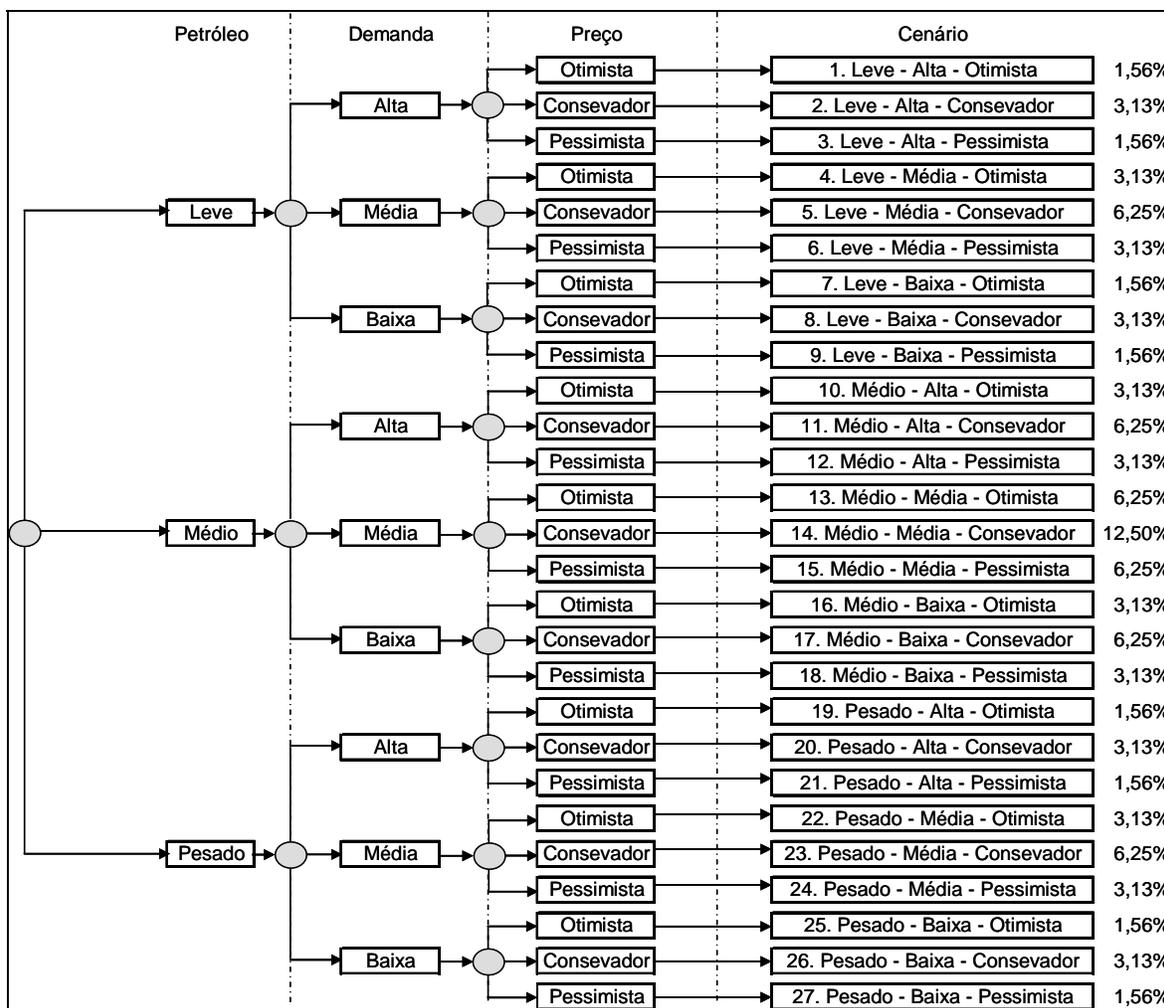


Figura 0.2: Cenários.

7.2

Desempenho Computacional

Os modelos propostos foram implementados no sistema de modelagem AIMMS (*Advanced Integrated Multidimensional Modeling Software*) e resolvidos com o solver CPLEX 11.0. A performance computacional dos modelos foi medida em um computador com processador Intel Core 2 Quad 3.1GHz com 8Gb de memória RAM.

Os modelos matemáticos apresentados no Capítulo 6 se baseiam na programação linear inteira mista (MILP), onde as variáveis de investimento foram definidas inteiras e as demais variáveis contínuas. No entanto o grande número de

cenários proposto inviabilizou a solução do problema com variáveis inteiras e optou-se por resolver um problema de grande porte usando apenas variáveis contínuas como mostra a tabela a seguir.

Tabela 0.2: Desempenho Computacional.

Modelo	Estocástico	Robusto	MinMax
# cenários	27	27	27
# restrições	5.642.366	5.642.393	5.643.086
# variáveis contínuas	4.179.168	4.179.169	4.179.168
# não zeros	11.638.049	11.638.103	11.638.769
# iterações	225.680	281.178	178.938
Tempo de CPU (s)	104,7 s	587,8 s	74,8 s

Os resultados da Tabela 7.2 para modelos baseados em programação linear (LP) indicam que o tempo de resolução não foi crítico para problemas com 27 cenários, mais de 5 milhões de restrições e mais de 4 milhões de variáveis contínuas. Nos modelos baseados em programação linear inteira mista (MILP) obteve-se solução para até 9 cenários.

7.3

Análise de Resultados

Os resultados desta seção tratam do problema de grande porte descrito na Tabela 7.2 relacionados aos modelos estocásticos, robusto e MinMax baseados em programação linear (LP).

7.3.1

Modelo Determinístico

O modelo determinístico foi utilizado para calcular a solução ótima para cada um dos cenários individualmente. No cálculo desta solução assume-se que o futuro é conhecido, ou seja, a solução obtida é a espere-e-veja (*wait-and-see*) descrita no Capítulo 3. O Gráfico 7.3 mostra o lucro obtido com a solução determinística espere-e-veja para cada um dos vinte sete cenários analisados neste trabalho. As barras com padrão preto representam os cenários com preço conservador, as barras em padrão

listrado representam os cenários com preço otimista e com padrão de losango os cenários com preço pessimista. A numeração dos cenários segue a mesma ordem mostrada na Figura 7.2.

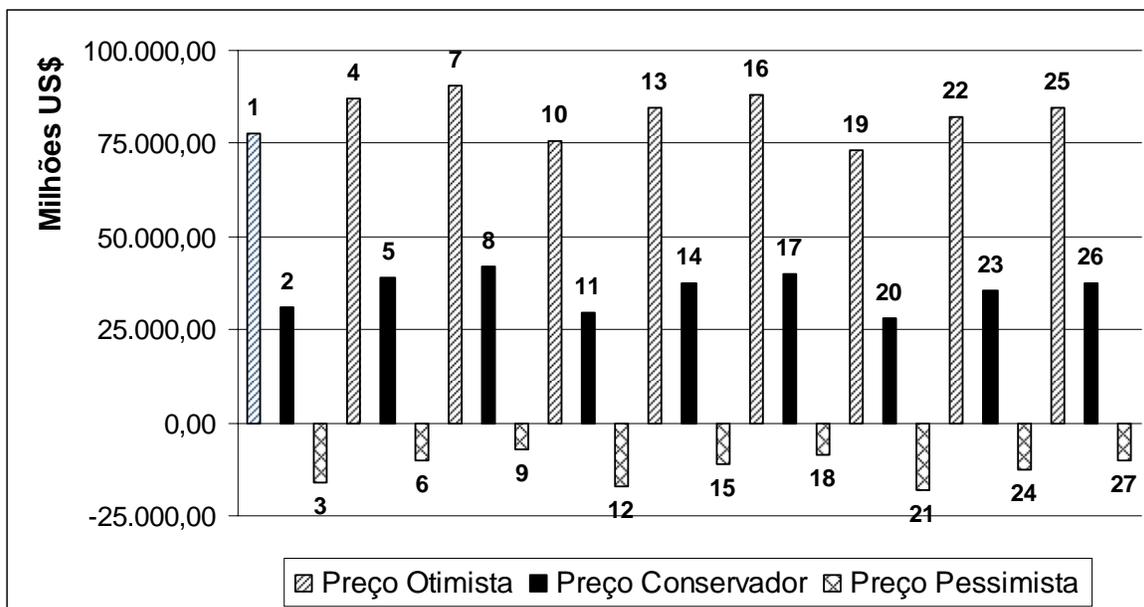


Gráfico 0-3: Lucro da solução espere-e-veja.

O cenário 14 corresponde a solução EV (*expected value*), isto é, a solução do problema que usa como dados de entrada a média dos parâmetros estocásticos (valor esperado de ξ). Usando o cenário 14 como referência, observa-se pelas barras em padrão preto que a função objetivo é menos sensível a variação de produção de petróleo e demanda de derivados. Já a variação dos preços causa significativo impacto sobre a função objetivo, os cenários com preço otimista obtiveram altos retornos e os cenários com preço pessimista tiveram grande prejuízo.

O valor esperado da solução espere-e-veja (WS) definida no Capítulo 3 pela expressão:

$$WS = E_{\xi} \left[z(x^*(\xi), \xi) \right] = \sum_{s=1}^S p_s z(x_s^*, \xi_s), \quad (7.1)$$

é dado pelo produto entre a probabilidade de cada cenário definida na Seção 7.1.3 e solução espere-e-veja obtida para cada cenário vista no Gráfico 7.3. O valor esperado WS para o problema estudado é de US\$35.789,52 Milhões.

7.3.2

Modelo Estocástico

O modelo estocástico foi utilizado para o cálculo da solução ótima do problema de recurso fixo proposto. O Gráfico 7.4 mostra o lucro obtido com a solução estocástica para cada cenário através do modelo estocástico, os resultados correspondem às realizações de segundo estágio avaliadas com a solução de primeiro estágio fixa e definida pelo modelo estocástico. Este resultado, assim como o anterior, destaca a relação entre o lucro e o preço realizado em cada cenário.

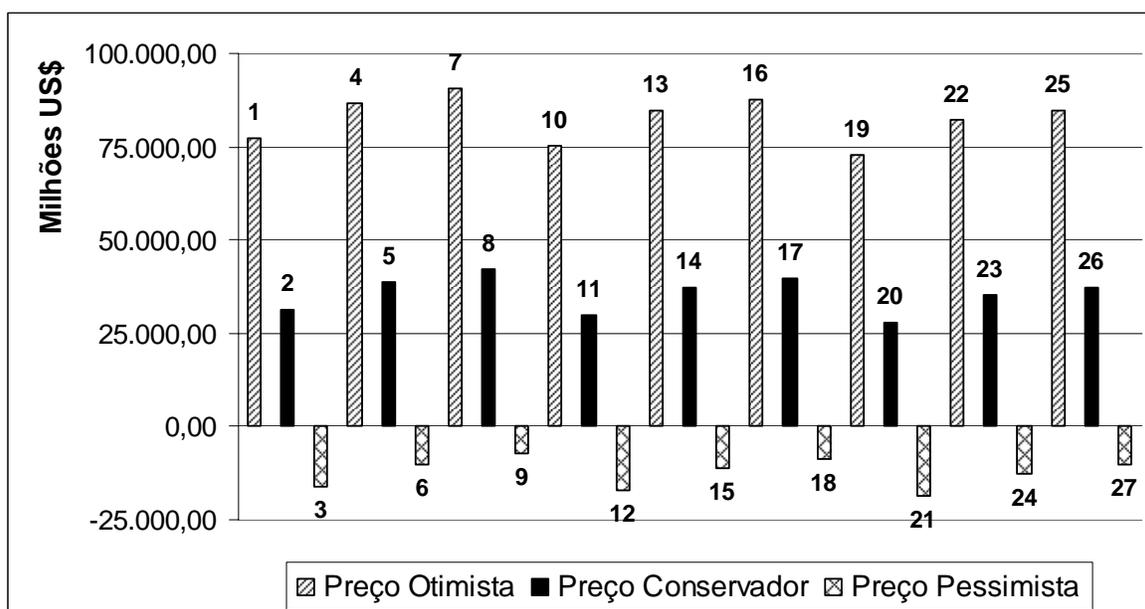


Gráfico 0-4: Lucro da solução estocástica.

A solução estocástica apresenta o mesmo comportamento observado na solução espere-e-veja, isto é, cenários com preço otimista apresentaram altos retornos e cenários com preço pessimista retornos negativos. O valor esperado da solução estocástica (RP) definido no Capítulo 3 pela expressão:

$$RP = E[z(x, \xi)] = \sum_{s=1}^S p_s z(x, \xi_s). \quad (7.2)$$

é dado pelo produto entre a probabilidade de cada cenário definida na Seção 7.1.3 e a solução estocástica obtida para cada cenário vista no Gráfico 7.4. O valor esperado RP para o problema estudado é de US\$35.738,86 Milhões.

Comparando as soluções estocástica e espere-e-veja para cada cenário através da diferença entre elas obtem-se o Gráfico 7.5. No gráfico abaixo, a diferença entre o lucro da solução estocástica e da solução espere-e-veja está relacionada com a demanda realizada em cada cenário.

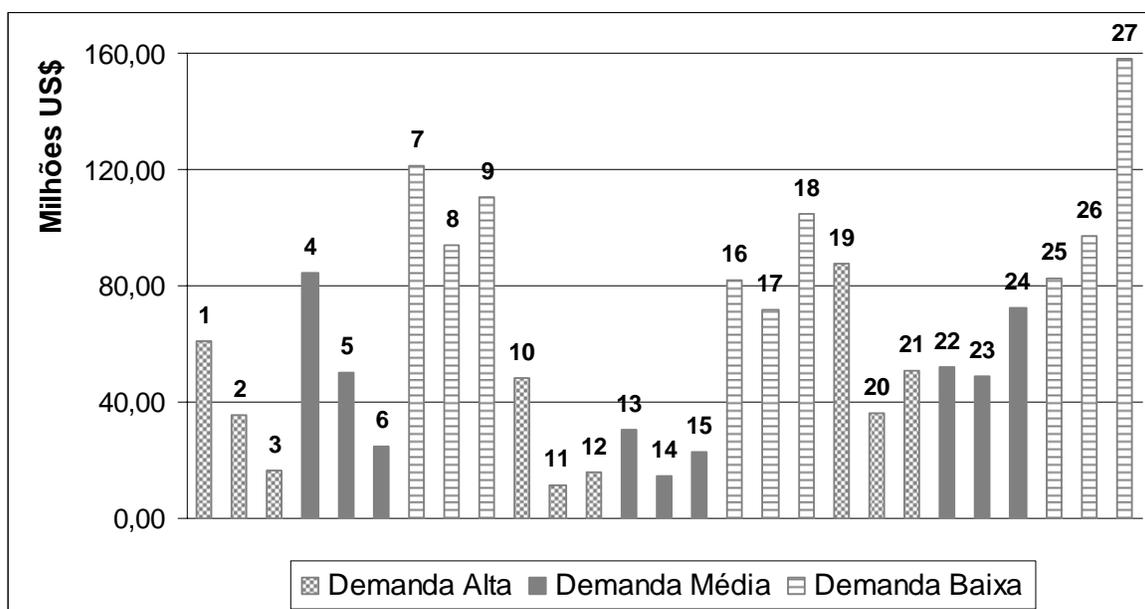


Gráfico 0-5: Diferença entre o lucro da solução espere-e-veja e da solução estocástica.

A solução espere-e-veja é um limite superior para o problema de maximização estocástico, logo as diferenças encontradas para cada cenário são sempre positivas. Observa-se no Gráfico 7.5 que dos dez cenários com diferença superior a US\$80 Milhões, oito são cenários com demanda de derivados baixa. Este resultado mostra que a solução de primeiro estágio definida pelo modelo estocástico se adequou

melhor a realizações de demanda alta e média, mantendo a solução destes cenários mais próxima da obtida pela solução espere-e-veja.

As seções seguintes apresentam análises mais detalhadas sobre os resultados do modelo estocástico. A Seção 7.3.2.1 mostra as medidas de comparação entre o modelo estocástico e determinístico vistas no Capítulo 3. A Seção 7.3.2.2 analisa a decisão de primeiro estágio e Seção 7.3.2.3 avalia o comportamento das exportações e importações para cada cenário.

7.3.2.1

Valor Esperado da Informação Perfeita (EVPI) e Valor da Solução Estocástica (VSS)

O valor esperado da informação perfeita (EVPI) é, por definição, a diferença entre o valor esperado das soluções espere-e-veja e estocástica:

$$EVPI = |WS - RP|. \quad (7.3)$$

O valor da solução estocástica (VSS) é dado por:

$$VSS = |EEV - RP|, \quad (7.4)$$

onde o EEV mede a performance da solução de primeiro estágio obtida usando a média dos parâmetros estocásticos (cenário 14 - solução EV) para cada realização.

O Gráfico 7.6 mostra os valores obtidos para o EVPI e o VSS para o problema estudado.

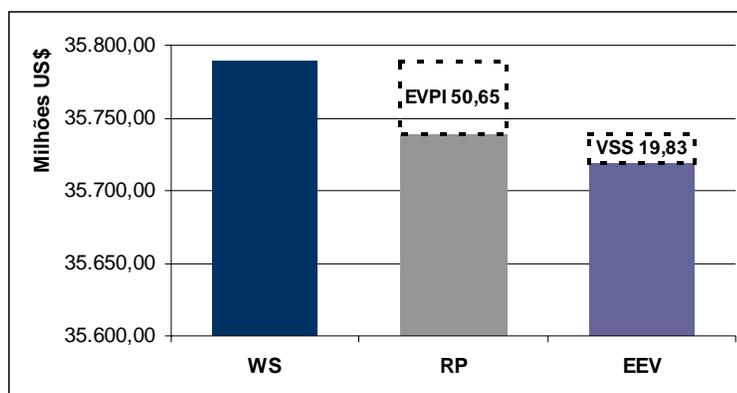


Gráfico 0-6: EVPI e VSS.

Os US\$50,65 Milhões referentes ao EVPI representam a diferença entre a solução obtida pelo agente com poder de predição perfeita (WS) e o agente que resolve o problema sob incerteza (RP), ou seja, quanto menor o valor do EVPI melhor o modelo estocástico acomoda as incertezas. O VSS de US\$19,83 Milhões pode ser interpretado como o ganho esperado do agente que considerou a incerteza, ou ainda, como a perda esperada do agente que optou pela modelagem determinística utilizando a média dos parâmetros estocásticos.

Nesta primeira análise o valor do VSS parece justificar uma modelagem estocástica, pois o ganho esperado é de US\$19,83 Milhões (0,06%). No entanto, apesar dos valores obtidos pelo EVPI e o VSS serem significativos, quando comparados com o retorno total das operações ligadas ao planejamento estratégico, estes mesmo valores se tornam relativamente pequenos. Todavia, para o problema de planejamento estratégico é mais indicado avaliar as soluções dadas pelo EVPI e o VSS com relação apenas aos custos de investimento referentes à decisão de primeiro estágio. O Gráfico 7.7 apresenta os valores do EVPI e VSS considerando apenas os custos de investimento em refino³.

³ Neste estudo foram considerados apenas investimentos em refino, pois não foram levantados dados suficientes para tratar investimentos em transporte.

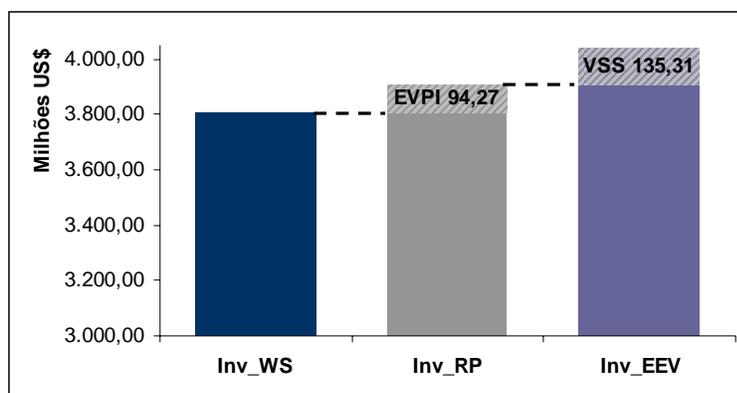


Gráfico 0-7: EVPI e VSS - Custo de Investimento.

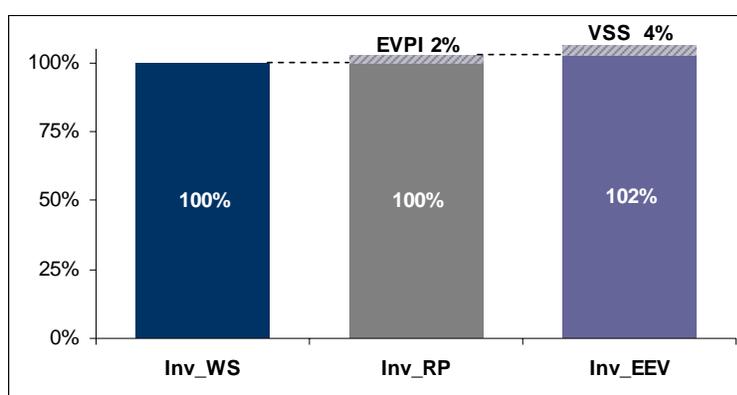


Gráfico 0-8: EVPI e VSS - Custo de Investimentos - Percentual.

Nesta abordagem as soluções WS, RP e EEV estão sendo tratados em função de custos. O custo de investimento da solução espere-e-veja (Inv_WS) é menor do que o da solução estocástica (Inv_RP), que por sua vez é menor do que o da solução usando a média dos parâmetros estocásticos (Inv_EEV). Os custos de investimentos (parcela referente ao problema de primeiro estágio) não necessariamente precisam se comportar desta forma ($Inv_WS < Inv_RP < Inv_EEV$), já que o custo referente ao problema de primeiro estágio pode ser compensado por uma alta receita no problema de segundo estágio. A diferença entre Inv_WS e Inv_RP é equivalente a US\$94,27 Milhões. No entanto, a solução espere-e-veja é impossível de ser realizada na prática, pois implica num perfil de investimento distinto para cada cenário. Observa-se que mesmo o Inv_WS estando associado a uma solução utópica, o custo de investimento proposto pelo modelo estocástico é muito próximo ao custo dado pela solução espere-e-veja (2% de diferença). A diferença entre Inv_RP e Inv_EEV é de US\$135,31

Milhões (4%) e corresponde a perda esperada pelo agente que optou pela solução determinística usando a média dos parâmetros estocásticos.

Sobre a solução do modelo estocástico podem ser destacados três pontos ao seu favor: (1) o lucro obtido em RP é maior que o EEV; (2) o modelo estocástico avalia sua solução de primeiro estágio sob a hipótese de ocorrência de todos os cenários e (3) o custo Inv_RP é menor que o Inv_EEV. Esses três pontos caracterizam um incentivo real para o uso da modelagem estocástica neste problema. Ainda será visto na próxima seção que o perfil de investimento associado à solução RP é muito diferente do EEV e esta informação sobre quando e quanto deve ser investido ao longo do horizonte de tempo é muito importante para quem planeja.

7.3.2.2

Análise de Investimentos (Decisão de Primeiro Estágio)

O perfil de investimentos em termos da capacidade das unidades de processo dados pela solução RP e EEV estão nas Tabelas 7.3 e 7.4. A Tabela 7.5 mostra a diferença entre as capacidades das soluções RP e EEV.

Tabela 0.3: Investimentos – Solução RP.

Tipo de Unidade	Solução de Primeiro Estágio - Estocástica (RP) - Capacidade Investida em m3/dia										Total	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Destilacao a Vacuo		12.760	5.607					5.614	4.103		12	28.097
Craqueamento Catalítico					2.916	167	9.658	17				12.758
Hidrocraqueamento Catalítico							1.562	214				1.775
Hidrodessulfurização			4.283	16.312	60.033	3.049	241	412	166	96		84.593
Hidrotratamento		1.776	1.784	194	1.460	1.173	697	38		18		7.140
Coqueamento Retardado		4.966	4.711	1.076	9.593	7.424	3.896	224		100		31.991
Reforma Catalítica		2.300										2.300
												168.654

Tabela 0.4: Investimentos – Solução EEV.

Tipo de Unidade	Solução de Primeiro Estágio - Média do Parâmetros estocásticos (EEV) - Capacidade Investida em m3/dia										Total	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Destilacao a Vacuo			8.721	9.961				5.614	8.513		12	32.821
Craqueamento Catalítico					2.916	167	9.658	17				12.758
Hidrocraqueamento Catalítico							1.578	443				2.021
Hidrodessulfurização			5.977	16.245	58.065	4.424	241	530		8		85.488
Hidrotratamento		1.776	1.777	201	1.313	1.314	697	78		1		7.157
Coqueamento Retardado		4.966	4.673	1.115	7.701	8.145	3.899	448		3		30.950
Reforma Catalítica		2.300										2.300
												173.495

Tabela 0.5: Diferença entre investimentos (RP - EEV).

Tipo de Unidade	Diferença entre RP e EEV - Capacidade Investida em m ³ /dia										Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Destilação a Vácuo		12.760	-3.114	-9.961				-4.410			-4.724
Craqueamento Catalítico											0
Hidrocrackeamento Catalítico							-16	-230			-246
Hidrodessulfurização			-1.693	67	1.969	-1.375		-118	166	89	-895
Hidrotratamento			7	-7	148	-142		-41		18	-17
Coqueamento Retardado			39	-39	1.892	-721	-3	-224		97	1.041
Reforma Catalítica											0
											-4.841

Na Tabela 7.5, observa-se, a partir das diferenças de capacidade investida, que a solução RP investe menos nas unidades do tipo destilação a vácuo (-4.724,48 m³/dia), hidrocrackeamento catalítico (-245,90 m³/dia), hidrodessulfurização (-894,74 m³/dia) e hidrotratamento (-16,92 m³/dia). A decisão de primeiro estágio dado pelo modelo estocástico (RP) investe mais apenas nas unidades do tipo coqueamento retardado (1.040,74m³/dia). Este tipo de unidade converte quimicamente resíduos para obtenção de frações mais leves e permite um melhor aproveitamento do petróleo processado nas refinarias nacionais, pois melhora o rendimento da produção de derivados mais leves e com maior valor comercial. Uma capacidade maior das unidades do tipo coqueamento retardado tem especial utilidade nos cenários com aumento da produção de petróleo nacional, variação que o problema usando a média dos parâmetros estocásticos não considera.

Apesar da solução RP investir menos em alguns tipos de unidades, ela antecipa alguns investimento com relação a solução EEV (células com padrão cinza). A antecipação permite atender melhor as possíveis variações de demanda e de produção. A menor capacidade das unidades de tratamento (hidrocrackeamento catalítico, hidrodessulfurização e hidrotratamento) observada no perfil de investimento em RP está relacionada aos cenários com aumento de produção de petróleo leve, para os quais não são necessários processos tão severos para eliminar impurezas.

A inclusão de incertezas em um modelo de planejamento estratégico da cadeia integrada de petróleo permite reduzir os custos de investimentos em cerca de US\$135 Milhões (ver VSS no Gráfico 7.7) e torna mais preciso o momento do investimento e

a capacidade das unidades de processo que compõem o parque de refino nacional ao longo do horizonte de tempo analisado.

7.3.3

Modelo Robusto

O modelo robusto foi utilizado para o cálculo da solução ótima do problema de planejamento estratégico proposto. O Gráfico 7.9 mostra o lucro obtido com a solução robusta para cada cenário.

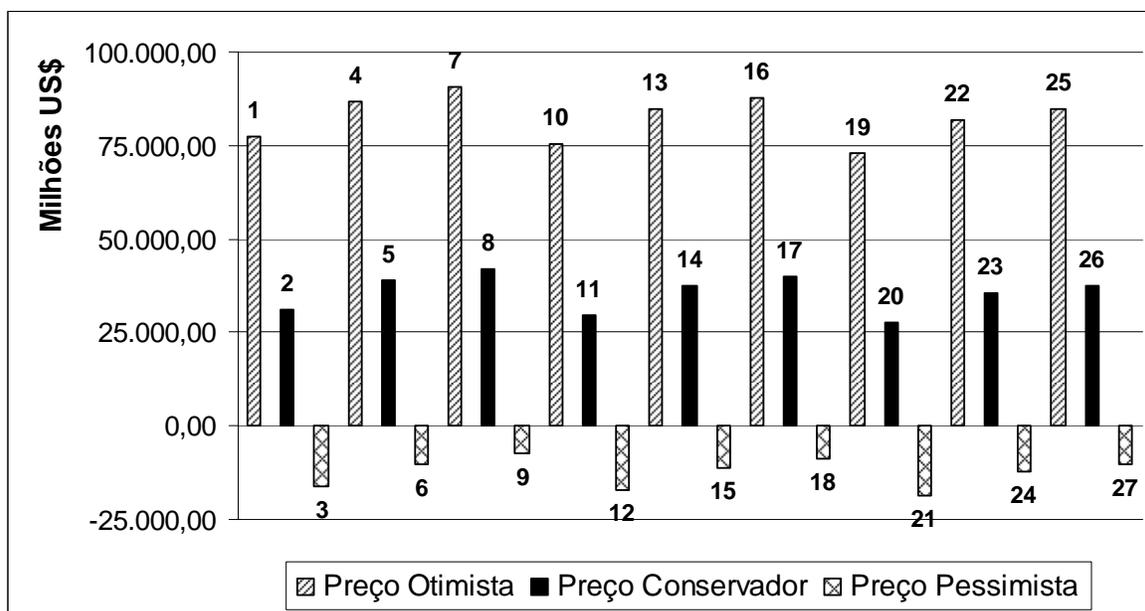


Gráfico 0-9: Lucro da solução robusta.

A solução robusta apresenta o mesmo comportamento observado nas soluções espere-e-veja e estocástica, isto é, cenários com preço otimista apresentaram altos retornos e cenários com preço pessimista retornos negativos. O valor esperado da solução robusta é dado pelo produto entre a probabilidade de cada cenário definida na Seção 7.3.3 e solução robusta obtida para cada cenário vista no Gráfico 7.9:

$$Robusta = \sum_{s=1}^S p_s z(x_{robusta}^*, \xi_s), \quad (7.5)$$

onde p_s é a probabilidade de cada cenário definida na Seção 7.1.3 e $x_{robusta}^*$ a solução de investimento ótima calculada com o modelo robusto. O valor esperado Robusta para o problema estudado é de US\$35.725,05 Milhões.

Comparando as soluções robusta e espere-e-veja para cada cenário através da diferença entre elas obtém-se o Gráfico 7.10. Novamente a diferença está associada à realização de demanda em cada cenário.

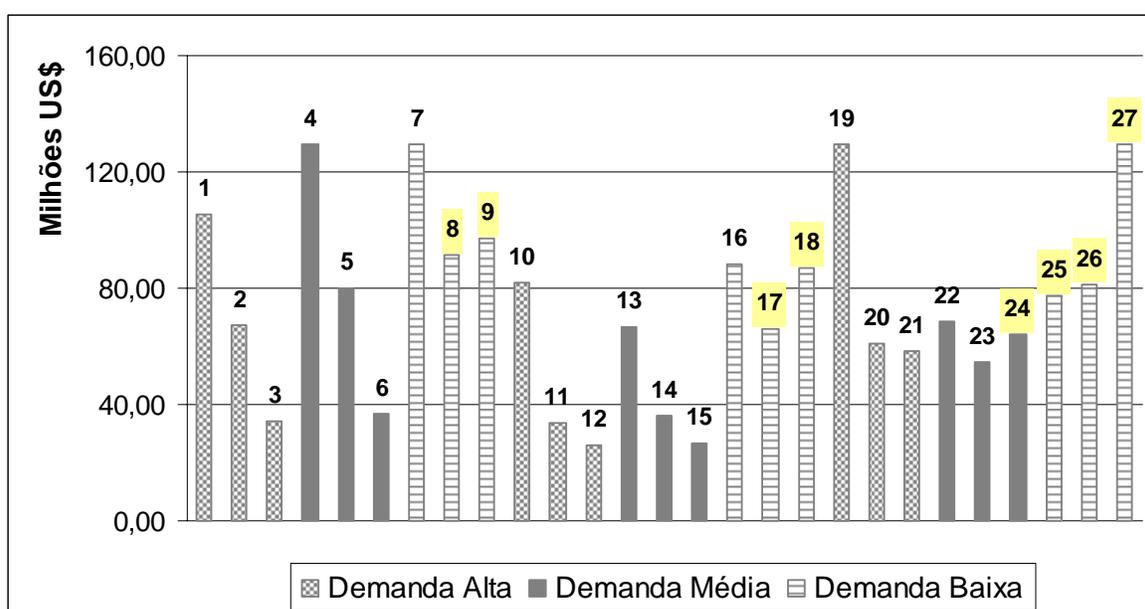


Gráfico 0-10: Diferença entre o lucro da solução espere-e-veja e da solução robusta.

A solução robusta é caracterizada pelo comportamento conservador, minimizando o desvio entre a solução robusta e a espere-e-veja. Nos cenários destacados em amarelo este desvio foi menor do que o obtido com o modelo estocástico, em compensação para os demais cenários foi superior. A vantagem do modelo robusto é a garantia de que todos os cenários estarão abaixo de um certo desvio α minimizado pela função objetivo independente da probabilidade. Neste problema o desvio ficou em torno de US\$130 Milhões, ou seja, nenhum cenário na solução robusta desvia da solução espere-e-veja em mais de US\$130 Milhões.

Voltando ao Gráfico 7.5 vemos que o maior desvio encontrado na solução estocástica é de cerca de US\$160 Milhões (cenário 27).

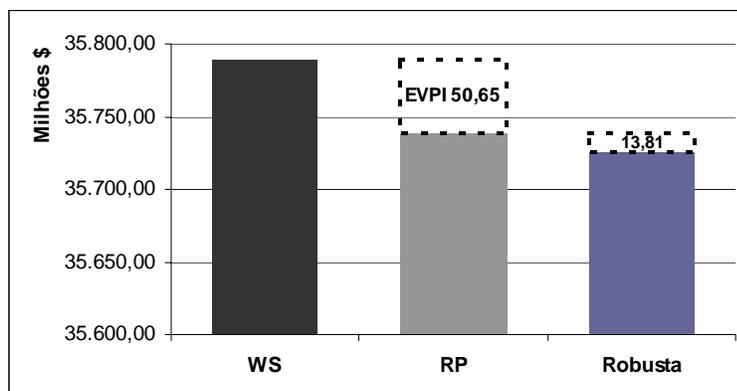


Gráfico 0-11: Valor esperado da solução robusta.

Comparando o valor esperado da solução estocástica com o da solução robusta observa-se uma diferença de US\$13,81 Milhões. Note que este valor não tem a mesma representação do VSS, pois neste caso os modelos possuem objetivos diferentes. O modelo estocástico está minimizando o valor esperado do retorno total e o modelo robusto está minimizando o arrependimento dado pelo desvio entre a solução espere-e-veja e a robusta. Estes US\$13,81 Milhões correspondem à perda esperada do agente que optou pela modelagem robusta, onde essa agente possui comportamento avesso ao risco.

Assim como no caso da modelagem estocástica o modelo robusto será avaliado com relação aos custos de investimento referentes à decisão de primeiro estágio.

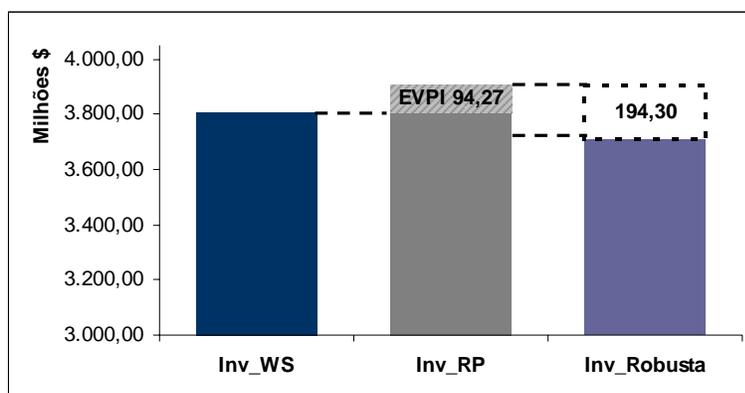


Gráfico 0-12: Modelo robusto - Custo de investimentos.

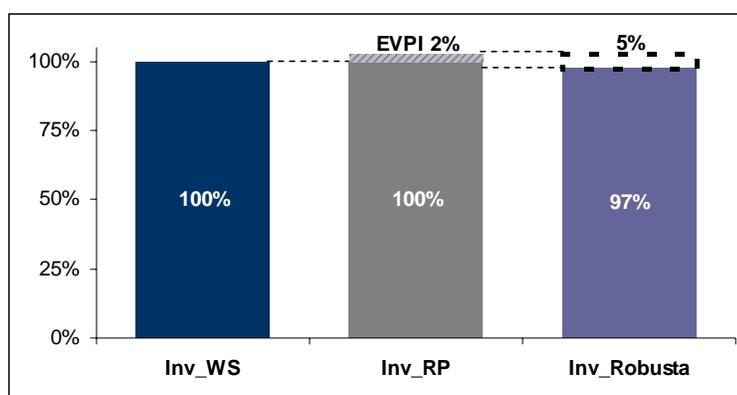


Gráfico 0-13: Modelo robusto - Custo de investimentos - Percentual.

Nesta abordagem o custo de investimento referente à solução robusta é menor que a Inv_WS e a Inv_RP. A solução robusta é mais conservadora, e esta mais preocupada com os cenários que apresentam altos desvios. No problema estudado o cenário com maior desvio é um cenário com prejuízo, demanda interna baixa e preço pessimista (cenário 27). A solução de primeiro estágio que beneficia este tipo de cenário é uma com poucos investimentos, pois com a demanda baixa e preços em queda não há nenhum incentivo para produzir muito e o melhor é não investir na capacidade produtiva das refinarias.

O comportamento mais conservador representado pela decisão de investimento robusta reduz em 5% os custos de investimento, mas significam uma perda de US\$78,59 Milhões no valor esperado do retorno total. Cabe ao tomador de decisão avaliar qual comportamento é mais adequado ao seu perfil de risco.

7.3.4

Modelo MinMax

O modelo MinMax foi utilizado para o cálculo da solução ótima do problema de planejamento estratégico proposto com o objetivo de maximizar o retorno do pior cenário. O Gráfico 7.14 mostra o lucro obtido em cada cenário através do modelo MinMax.

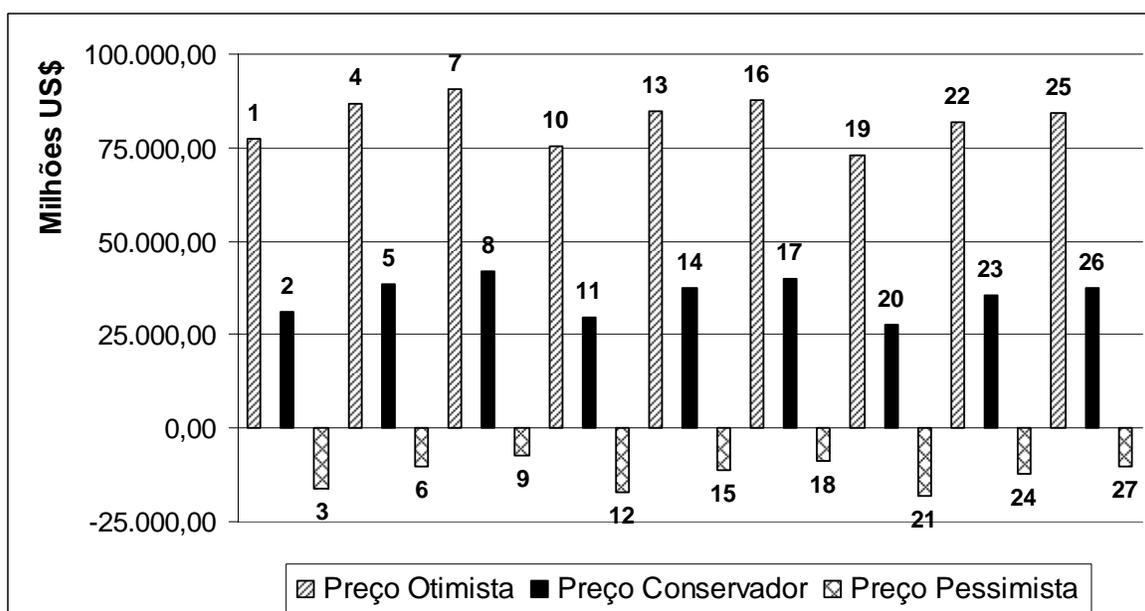


Gráfico 0-14: Lucro da solução MinMax.

A solução MinMax apresenta o mesmo comportamento visto nas soluções nos demais modelos. O valor esperado da solução MinMax é dado pelo produto entre a probabilidade de cada cenário definida na Seção 7.1.3 e solução MinMax obtida para cada cenário vista no Gráfico 7.14:

$$\text{MinMáx} = \sum_{s=1}^S p_s z(x_{\text{MinMáx}}^*, \xi_s), \quad (7.6)$$

onde p_s é a probabilidade de cada cenário definida na Seção 7.3.3 e x_{MinMax}^* a solução de investimento ótima calculada com o modelo MinMax. O valor esperado MinMax para o problema estudado é de US\$35.662,99 Milhões.

Comparando as soluções MinMax e espere-e-veja para cada cenário através da diferença entre elas obtém-se o Gráfico 7.15 .

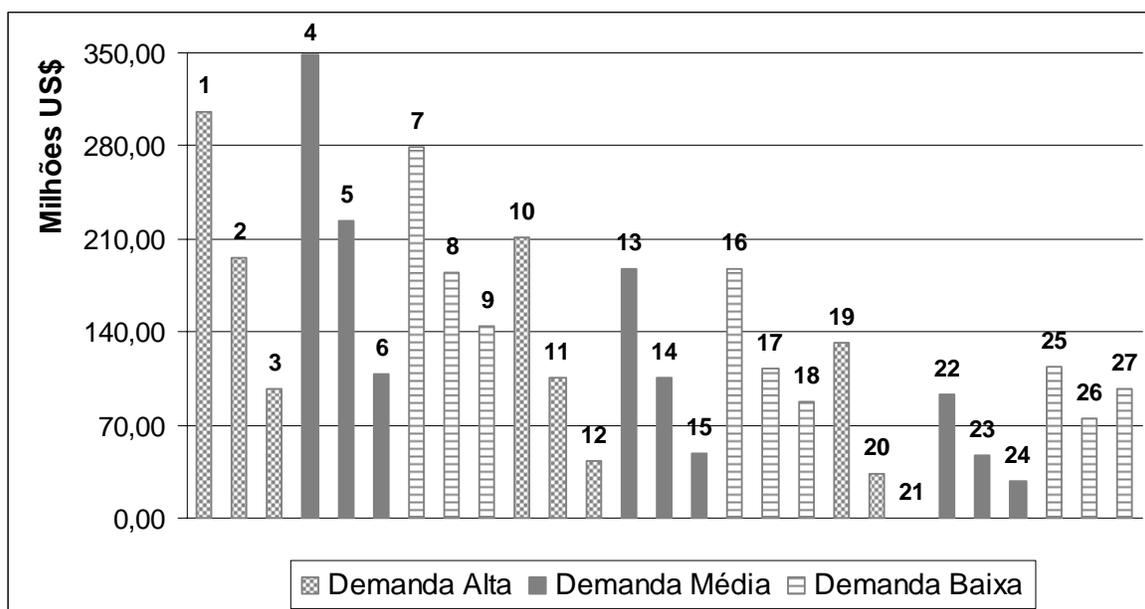


Gráfico 0-15: Diferença entre o lucro da solução espere-e-veja e da solução MinMax.

Assim como a solução robusta, a solução MinMax é caracterizada pelo comportamento conservador. Enquanto a solução robusta minimiza arrependimento mantendo a solução de todos os cenários abaixo de um desvio α , a solução MinMax maximiza o retorno do pior cenário. O cenário com pior retorno foi o 21 (veja Gráfico 7.3 da solução espere-e-veja), que corresponde ao aumento de produção de petróleo pesado, demanda interna alta e preço pessimista. Com o modelo MinMax a diferença para o cenário 21 mostrada do Gráfico 7.15 foi nula.

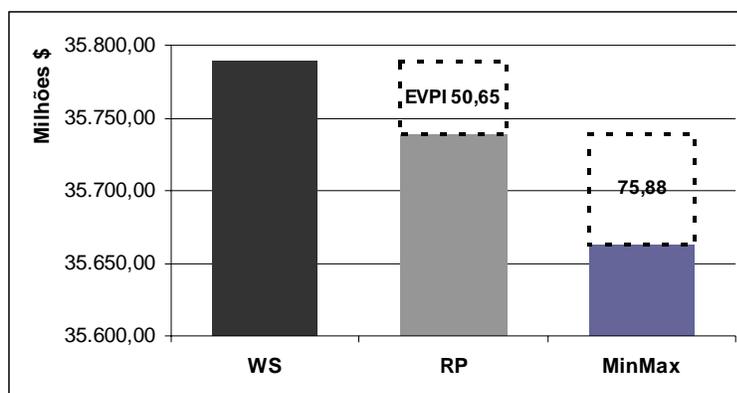


Gráfico 0-16: Valor esperado da solução MinMax.

Comparando o valor esperado da solução estocástica com o da solução MinMax observa-se uma diferença de US\$75,88 Milhões. Note que este valor não tem a mesma representação do VSS, pois neste caso os modelos possuem objetivos diferentes. Estes US\$75,88 Milhões correspondem à perda esperada do agente que optou pela modelagem MinMax, onde essa agente prefere maximizar seu retorno no pior cenário em detrimento dos outros.

Assim como feito nas outras abordagens, o modelo MinMax foi avaliado com relação aos custos de investimento referentes à decisão de primeiro estágio.

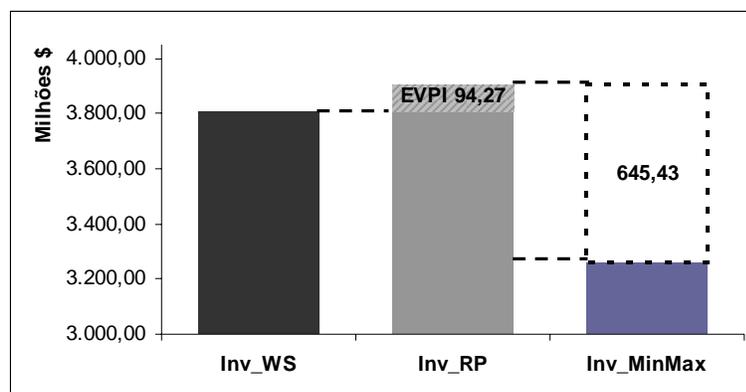


Gráfico 0-17: Modelo MinMax - Custo de investimentos.

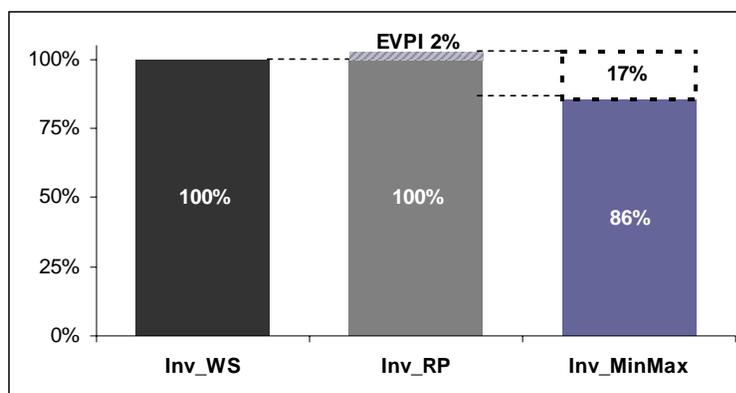


Gráfico 0-18: Modelo MinMax - Custo de investimentos - Percentual.

Nesta abordagem o custo de investimento referente à solução MinMax é menor que o Inv_WS e o Inv_RP. A solução de primeiro estágio MinMax é muito conservadora, e está preocupada apenas com o cenário de pior retorno. A solução de primeiro estágio que beneficia o pior cenário (cenário 21) é uma com poucos investimentos, pois tenta reduzir as despesas de forma a minimizar o prejuízo deste cenário. Uma redução de 17% em custo de investimento minimiza as perdas do pior cenário mas prejudica o valor esperado do retorno total. Novamente cabe ao tomador de decisão avaliar qual comportamento é mais adequado ao seu perfil de risco.

7.4

Resumo dos Resultados

A abordagem estocástica proposta foi comparada com a robusta e a MinMax. Nesta seção as soluções obtidas foram comparadas em termos do (1) valor esperado do lucro – objetivo do modelo estocástico, (2) lucro do cenário com maior desvio – objetivo do modelo robusto e (3) lucro do pior cenário – objetivo do modelo MáxMín.

Tabela 0.6: Resultados – Estocástico, Robusto e MinMax.

Modelo	Estocástico	Robusto	MinMax
Valor esperado do lucro	US\$MM 35.738,87	US\$MM 35.725,05	US\$MM 35.662,99
Lucro do cenário com maior desvio	-US\$MM 7.351,72	-US\$MM 7.338,08	-US\$MM 7.384,88
Lucro do pior cenário	-US\$MM 18.352,37	-US\$MM 18.360,26	-US\$MM 18.301,65

O modelo estocástico maximiza o valor esperado do retorno, apresentando o melhor resultado nesta medida de desempenho. O modelo robusto minimiza o arrependimento dado pelo desvio entre a solução espere-e-veja e a robusta, sendo assim, a solução do modelo robusto para o cenário com maior desvio possui o menor prejuízo. Analisando os resultados do cenário com pior retorno, o modelo MinMax apresenta o menor prejuízo. Dependendo do perfil de risco do agente, cada um dos modelos desenvolvidos se torna mais ou menos adequado ao processo de apoio a decisão.