

6 Confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos

Para a avaliação da confiabilidade da malha de gasodutos de transporte do Gasbol adotou-se a metodologia apresentada por Santos et al. (2006) aplicada às 10 estações de compressão do Gasbol (lado brasileiro), onde os autores apresentam uma avaliação estatística comparativa baseada em distribuição de probabilidade discreta binomial juntamente com a simulação Monte Carlo e, visto que a avaliação binomial exige que todos os equipamentos tenham a mesma disponibilidade (probabilidade), a configuração das estações de compressão foi simplificada, considerando-se unidades compressoras idênticas e com a mesma quantidade de unidades por estação. A simulação Monte Carlo não está sujeita a esta restrição, podendo ser aplicada a qualquer configuração de máquinas por estação e com disponibilidades individuais diferentes.

Os autores destacam a aplicabilidade do método de simulação Monte Carlo, sua simplicidade e maior flexibilidade.

Seguindo a mesma metodologia, foram consideradas as informações contidas no *Electric Power Research Institute - EPRI* (1999) e *North American Electric Reliability Council - NERC* (2005) para estações de compressão. Manteve-se a abordagem da simplificação do arranjo das estações de compressão, conforme figuras 13 e 14, onde vemos a arranjo das estações de compressão como estão instaladas no Gasbol e o modelo simplificado para efeito deste trabalho.

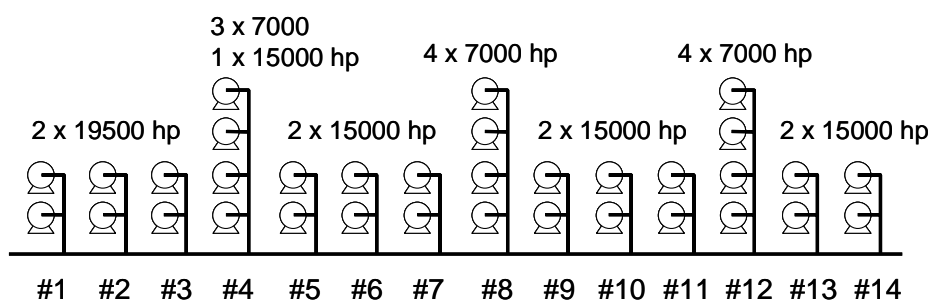


Figura 13 - Arranjo das Estações de Compressão do Gasbol como Instaladas

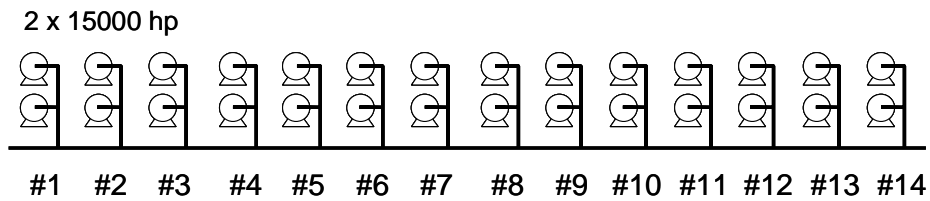


Figura 14 - Arranjo Simplificado das Estações de Compressão do Gasbol

Para a avaliação da disponibilidade de válvulas de bloqueio e pontos de entrega de gás adotou-se a metodologia apresentada por Mohitpour et al. (2005) baseada no estudo de árvore de falha.

A seguinte simbologia é adotada para a modelagem de uma árvore de falha:

Conexões Lógicas		Conexão OU – Indica que o evento de saída ocorre se qualquer um dos eventos de entrada ocorrer.
		Conexão E – Indica que o evento de saída ocorre somente se todos os eventos de entrada ocorrerem ao mesmo tempo.
Eventos de Entrada (estados)		Evento básico – representa a falha do equipamento que não requer maior desenvolvimento das causas de falha.
		Evento não concluído – representa um evento que não foi examinado por falta de informação ou porque sua consequência é insignificante.
Descrição do estado		Retângulo de comentário – para informação suplementar
Símbolos de transferência		Transferência de entrada – indica informação recebida de outra árvore de falha.
		Transferência de saída – indica que o resultado desta árvore alimenta outra árvore.

6.1 Estações de compressão

6.1.1 Electric Power Research Institute

Estudo realizado nos Estados Unidos, levantou dados de 269 estações de compressão, ao longo de 3 anos de operação, para 44 estações com acionador elétrico, 79 estações acionadas por turbinas a gás e 146 estações acionadas por motores a gás, apresenta os seguintes resultados para confiabilidade e disponibilidade:

Acionamento da Estação de Compressão	Confiabilidade	Disponibilidade
Motor elétrico + Compressor Centrífugo	99.4	98.9
Turbina a gás + Compressor Centrífugo	98.2	97.1
Motor a gás + Compressor Alternativo	97.1	94.3

6.1.2 North American Electric Reliability Council

O relatório produzido pela NERC tem como objetivo distribuir informação ao mercado americano sobre disponibilidade de equipamentos de geração separados por faixas de potência e tipo de combustível.

Adotam-se as seguintes equações, sem utilização de máquinas reservas:

$$\text{Confiabilidade} = 100 - \text{FOF}$$

$$\text{Disponibilidade} = 100 - (\text{FOF} + \text{SOF})$$

$$\text{FOF} = (\text{FOH} / \text{PH}) \times 100$$

$$\text{SOF} = (\text{SOH} / \text{PH}) \times 100, \text{ onde:}$$

$$\text{FOF} = \text{Fator de parada forçada (Forced Outage Factor)}$$

$$\text{FOH} = \text{Horas de parada forçada (Forced Outage Hours)}$$

$$\text{PH} = \text{Período em horas (Period, Hours)}$$

$$\text{SOF} = \text{Fator de parada programada (Scheduled Outage Factor)}$$

$$\text{SOH} = \text{Horas de parada programada (Scheduled Outage Hours),}$$

adotando-se:

$$\text{FOF} = 2.82\%$$

$$\text{SOF} = 4.24\%, \text{ tem-se:}$$

$$\text{Confiabilidade} = 100 - \text{FOF} = 0.9720$$

$$\text{Disponibilidade} = 100 - (\text{FOF} + \text{SOF}) = 0.9294$$

Os valores de FOF e SOF foram obtidos para equipamentos na faixa de potência (1 a 19 MW) com gás natural como combustível e, portanto, abrange os equipamentos utilizados no Gasoduto Bolívia - Brasil.

Ambas as fontes, EPRI e NERC, são respeitadas internacionalmente e seus trabalhos são fortemente baseadas em levantamentos estatísticos da operação de estações de compressão (EPRI) e de geração termelétrica (NERC). Foi adotado o valor de disponibilidade de 0.9294 obtido do NERC ao invés do apresentado pelo EPRI de 0.971 por se assemelhar mais com os valores observados ao longo dos cerca de 8 anos de operação do Gasbol, conforme verificação junto à equipe de operação da TBG, para suas estações de compressão, além do fato de ser mais conservador.

6.2

Válvula de bloqueio e ponto de entrega

A metodologia de avaliação da disponibilidade, baseada no estudo de árvore de falha, permite-nos quantificar a disponibilidade para cada um destes equipamentos e, então, utilizar tais valores de disponibilidade no modelo de simulação Monte Carlo elaborado para toda a malha do gasoduto.

Para tal avaliação é necessário conhecer o tempo médio entre falhas (MTBF), obtido da taxa de falhas, e o tempo médio para reparos (MTTR) dos componentes da válvula de bloqueio e do ponto de entrega (*city-gate*).

$$Disponibilidade = \frac{\textit{tempo disponível}}{\textit{tempo disponível} + \textit{tempo manutenção}} = 1 - (\textit{tempo manutenção} \times \textit{taxa de falhas})$$

$$\textit{Indisponibilidade} = \textit{tempo manutenção} \times \textit{taxa de falhas}$$

As taxas de falhas e o tempo médio para reparos, apresentados nas tabelas 1 e 2 são aqueles recomendados por Mohitpour et al. (2005) e aplicáveis para válvulas de bloqueio e pontos de entrega (*city-gates*). Essas tabelas também apresentam os resultados dos cálculos de indisponibilidade para válvulas de bloqueio e pontos de entrega.

Tabela 1 - Resultado da Avaliação de Indisponibilidade para Válvula de Bloqueio de Gasoduto

Item	Descrição	Tempo de Reparo, MTTR		Failure Rate	indisponibilidade	Observações
		Horas	Ano	Falhas / Ano	Anual	
5	Válvula de Bloqueio de Ponto de Entrega				5.06E-05	
	Transmissor de Pressão	6	0.000685	0.0263	1.80E-05	
	Operação espúria da Válvula	24	0.002740	0.0119	3.26E-05	

Tabela 2 - Resultado da Avaliação de Indisponibilidade para Ponto de Entrega

Item	Descrição	Tempo de Reparo, MTTR		Failure Rate	indisponibilidade	Observações
		Horas	Ano	Falhas / Ano	Anual	
1	Válvula Reguladora de Pressão, VRP1				1.26E-03	
	Controlador Pneumático	8	0.000913	0.377	3.44E-04	
	Transmissor de Pressão	10	0.001142	0.0263	3.00E-05	
	Válvula de Controle Penumática	13	0.001484	0.596	8.84E-04	
2	Válvula Reguladora de Pressão (Falha não detetada)				1.92E-02	MFDT, ver item 6.1.2.2
3	Válvula Reguladora de Pressão (em paralelo, em estado de falha), VRP2				2.42E-05	(item 2 x item 1)
4	Falha em Ambas as Válvulas Reguladoras de Pressão, VRP1 e VRP2				3.04E-08	(item 3 x item 1)
5	Válvula de Bloqueio de Ponto de Entrega				3.43E-05	
	Transmissor de Pressão	6	0.000685	0.0263	1.80E-05	
	Operação espúria da Válvula	12	0.001370	0.0119	1.63E-05	
6	Medidor de Turbina 1	10	0.001142	0.0263	3.00E-05	
7	Medidor de Turbina 2 (Falha não detetada)				3.29E-03	MFDT, ver item 6.1.2.2
8	Medidor de Turbina 2 (em paralelo, em estado de falha)				9.88E-08	(item 7 x item 6)
9	Falha em Ambos os Medidores de Turbina				2.97E-12	(item 8 x item 6)
10	Entupimento de Filtro/Separador	6	0.000685	0.00876	6.00E-06	
11	Indisponibilidade de Um Ponto de Entrega				4.03E-05	(itens 4 + 5 + 9 + 10)

6.2.1 Válvulas de bloqueio

A falha da válvula de bloqueio pode ocorrer tanto pela falha espúria do controle da válvula como também pela falha do transmissor de pressão que atua para seu fechamento. A indisponibilidade de cada um desses componentes é somada, resultando na indisponibilidade da válvula.

Aplicada a metodologia descrita no item anterior e a árvore de falha apresentada na figura 15 se obtém um valor de indisponibilidade de 0.0000506 (ver tabela 1) que corresponde a uma disponibilidade de 0.999949 para cada válvula de bloqueio. Este valor é utilizado na modelagem Monte Carlo para todas as válvulas de bloqueio da malha de gasodutos do Gasbol.

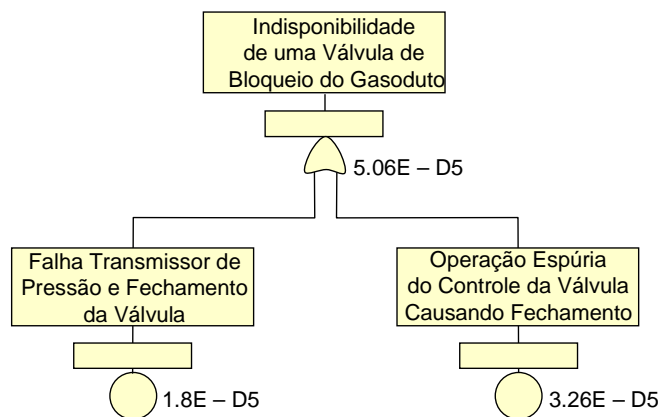


Figura 15 - Árvore de Falha para Avaliação da Indisponibilidade de Válvula de Bloqueio do Gasoduto

Operação espúria do controle da válvula

Taxa de falha = 0.0119 falhas (por ano)

Tempo de manutenção = 24 horas

Transmissor de pressão

Taxa de falha = 0.0263 falhas (por ano)

Tempo de manutenção = 6 horas

$$Indisponibilidade = \left(\frac{24}{24 \times 365} \times 0.0119 \right) + \left(\frac{6}{24 \times 365} \times 0.0263 \right) = 5.06 \times 10^{-5}$$

$$Disponibilidade = 1 - Indisponibilidade = 1 - 0.0000506 = 0.999949$$

6.2.2 Ponto de entrega do gás

A falha do ponto de entrega de gás é um pouco mais complexa que a falha da válvula de bloqueio já que depende da falha de mais componentes e alguns deles possuem reserva instalada, como no caso do medidor tipo turbina e da válvula controladora de pressão.

Aplicada a metodologia descrita no item anterior e a árvore de falha apresentada na figura 16 se obtém um valor de indisponibilidade de **0.00004033** (ver tabela 2) que corresponde a uma disponibilidade de **0.99996** para cada ponto de entrega. Este valor é utilizado na modelagem Monte Carlo para todos os pontos de entrega de gás da malha de gasodutos do Gasbol.

Na utilização de equipamento reserva, em paralelo, a falha só ocorrerá se ambos os equipamentos falharem. Mohitpour et al. (2005) apresenta a seguinte abordagem que resulta num valor de probabilidade a ser multiplicado pela indisponibilidade calculada para o equipamento em operação. Tal probabilidade está relacionada com a falha do equipamento reserva quando esse é requerido operar para cobrir a falha do equipamento em paralelo. É apresentado o conceito de *mean fractional dead time* (fração média do tempo morto) – MFDT que pode ser entendido como a probabilidade de o equipamento reserva estar num estado dormente de falha, desconhecido pela equipe de manutenção, e só observado quando o equipamento é requerido entrar em operação em substituição daquele que veio a falhar e, conseqüentemente, causando a falha do sistema inteiro, neste caso, o ponto de entrega de gás.

$$MFDT = \frac{1}{2} \times \lambda \times \tau$$

λ , taxa de falha

τ , intervalo de teste

Operação em paralelo da válvula redutora de pressão

Intervalo de teste da válvula reserva = 1 vez a cada duas semanas

Taxa de falha = 0.999 falhas (por ano) [considera válvula de controle, transmissor de pressão e controlador pneumático]

$$MFDT = \frac{1}{2} \times \frac{0.999}{ano} \times \frac{2 \text{ semanas}}{52 \text{ semanas/ano}} = 0.0192$$

Operação em paralelo do medidor tipo turbina

Intervalo de teste da turbina reserva = 1 vez a cada três meses

Taxa de falha = 0.0263 falhas (por ano)

$$MFDT = \frac{1}{2} \times \frac{0.0263}{ano} \times \frac{3 meses}{12 meses/ano} = 0.00329$$

Estes valores de probabilidade estão inseridos na árvore de falha apresentada na figura 16 para a determinação da indisponibilidade e conseqüentemente da disponibilidade do ponto de entrega de gás.

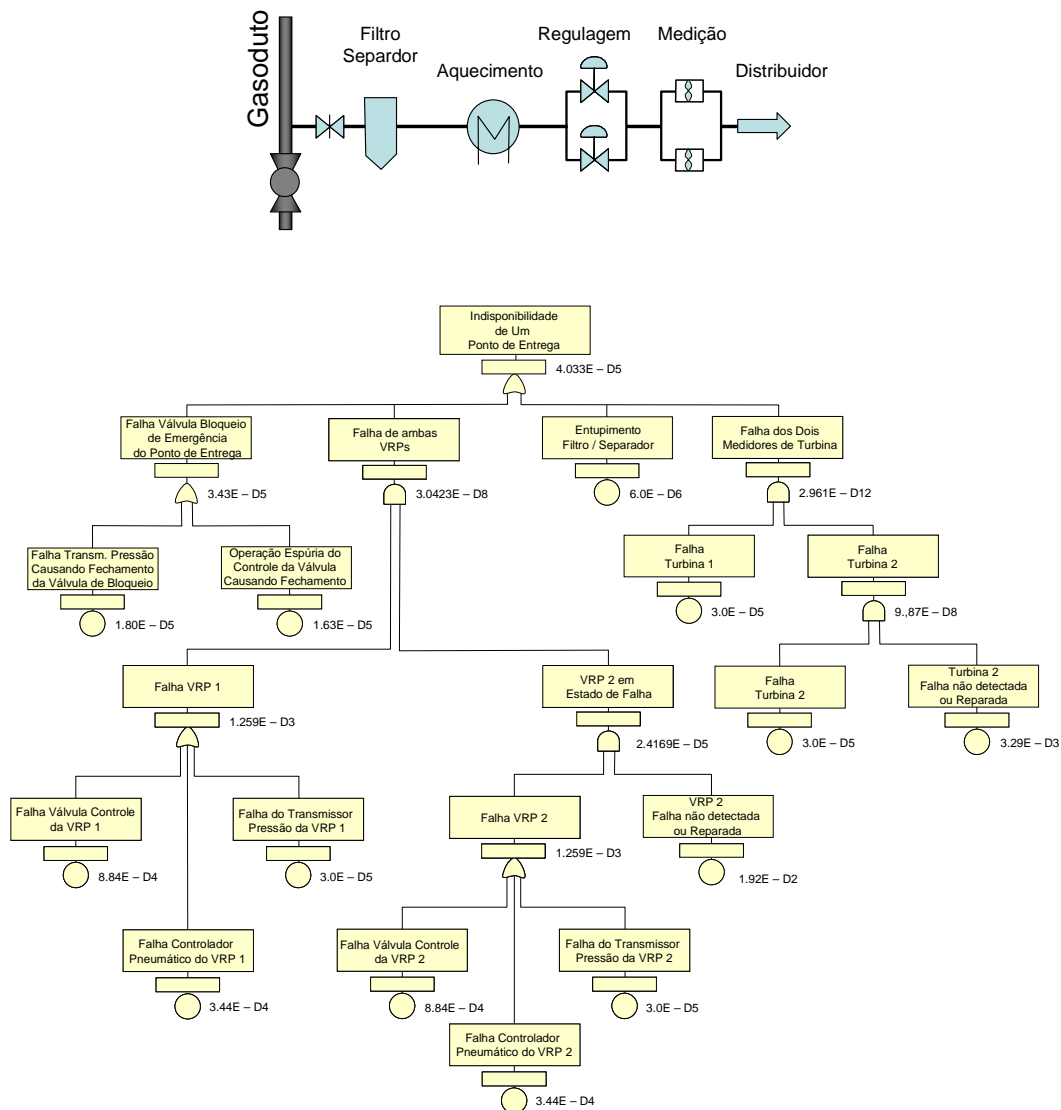


Figura 16 – Configuração e Árvore de Falha para Avaliação da Disponibilidade de Ponto de Entrega

6.3 Pontos de recebimento de gás

No caso do Gasbol, o recebimento do gás natural exportado para o Brasil ocorre na Planta de Processamento de Gás de Rio Grande, operada pela ANDINA, que possui uma estação de compressão que é responsável de comprimir o gás, recebido de diferentes produtores situados em diferentes regiões da Bolívia e processada na Planta, para a entrada no gasoduto.

A estação de compressão apresentada na figura 17 é composta de 7 unidades compressoras, em paralelo, cujas características são apresentadas na tabela 3 e que inclui uma máquina reserva.

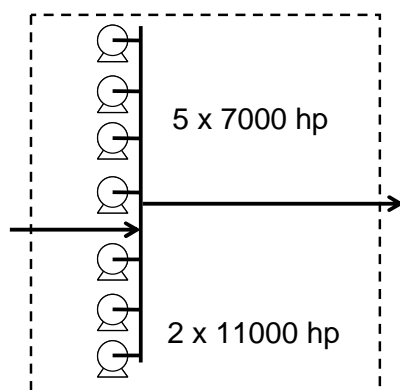


Figura 17 - Estação de Compressão de Rio Grande

Tabela 3 - Unidades Compressoras da Estação de Rio Grande

Item	Quantidade	Fabricante	Modelo do Acionador	Potência ISO, hp	Capacidade Compressão, MMm3/d	Obs.:
1	3	Solar	Taurus 60	7000	3 x 4.5	
2	2	Solar	Taurus 70	7800	2 x 5	
3	2	MannTurbo	THM 1304-11	11000	1 x 11	1 unid. Reserva
Capacidade Total de Compressão (sem reserva)					34.5	

A disponibilidade da estação foi avaliada através de Simulação Monte Carlo, considerando a disponibilidade de 0.9294 para cada unidade compressoras, e os resultados, com intervalo de confiança de 90%, são apresentados na figura 18 para a condição sem unidade compressoras reserva e na figura 19 para a condição de uma máquina reserva de 11000 hp. O eixo x apresenta os valores de capacidade de transporte em MMm3/d e o eixo y a frequência percentual. As capacidades de transporte decorrentes de falhas de unidades compressoras são obtidas das

simulações termohidráulicas. As frequências percentuais, representadas pelas barras verticais, são obtidas das simulações Monte Carlo de falha de unidades compressoras.

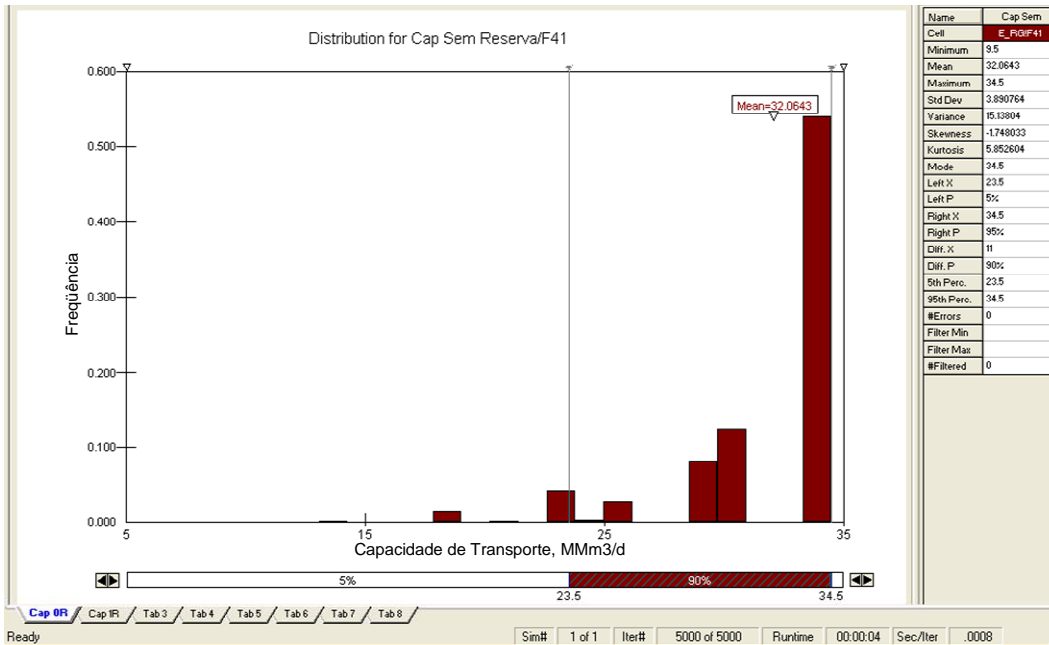


Figura 18 – Frequência de Capacidade de Suprimento sem Unidade Compressora Reserva – Estação de Rio Grande

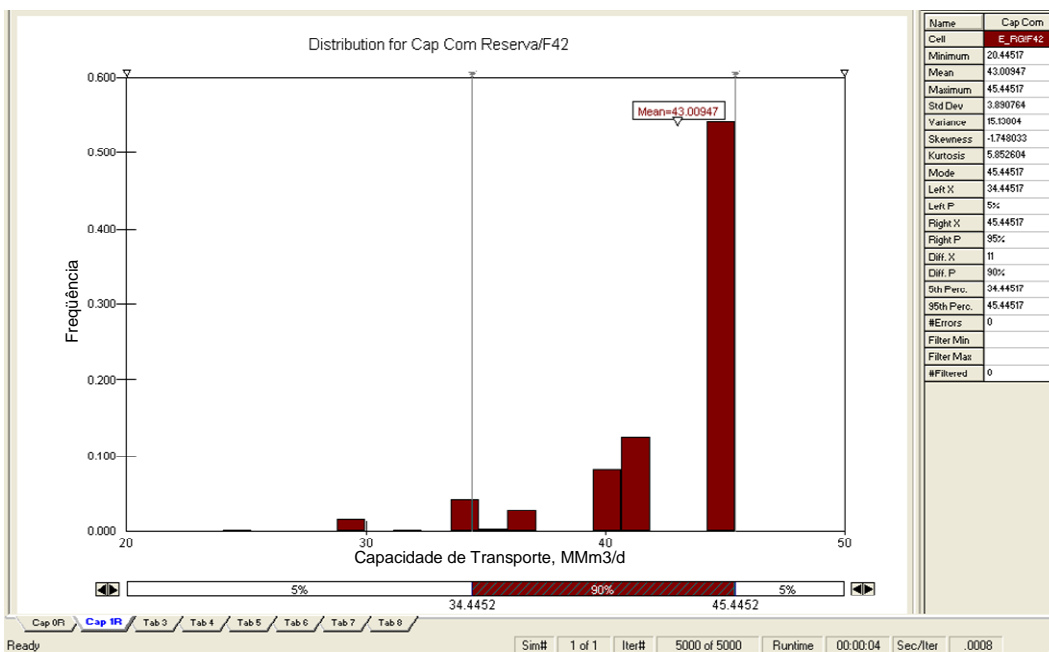


Figura 19 – Frequência de Capacidade de Suprimento com Unidade Compressora Reserva – Estação de Rio Grande

Visto que a reserva de capacidade instalada de compressão para a estação de Rio Grande, para um intervalo de confiança de 90% garante que a capacidade de suprimento estará acima de 34.4452 e abaixo de 45.4452 MMm³/d e, que o suprimento de gás contratado (mercado + gás combustível) é de cerca de 31.8 MMm³/d, conclui-se que não há risco associado ao suprimento de gás no que tange à Estação de Compressão de Rio Grande.

Visto que o fornecimento de gás natural é objeto de um contrato específico entre PETROBRAS e Yacimientos Petrolíferos Fiscales - YPFB sob cláusula de *supply-or-pay* e *take-or-pay* a quantificação da disponibilidade da estação de compressão de Rio Grande tem um caráter apenas de constatação de sua capacidade de atendimento ao Contrato.