

## 7 Simulação Monte Carlo

Visto que a configuração do negócio envolve diferentes empresas como Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos – YPFB, Empresa Petrolera Andina S.A. – ANDINA, Gas TransBoliviano S.A. – GTB, Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia – Brasil S.A. – TBG e Petróleo Brasileiro S.A. – PETROBRAS, a modelagem levou isso em conta para mapear as disponibilidades e os investimentos em redundância para as respectivas empresas relacionadas diretamente com a infra-estrutura de transporte, como detalhado a seguir.

- Suprimento de gás
  - YPFB, agregador dos volumes de gás dos diversos produtores na Bolívia;
  - ANDINA, operadora da estação de compressão de Rio Grande no início do Gasbol
- Transporte do lado boliviano
  - GTB, opera o trecho do Gasbol de Rio Grande até a fronteira com o Brasil;
- Transporte do lado brasileiro
  - TBG, opera os seguintes trechos do Gasbol no Brasil:
    - Trecho Norte, da Fronteira até Campinas (SP)
    - Trecho Sul, de Campinas (SP) até Canoas, Porto Alegre (RS)
    - Interligação, trecho entre Campinas (SP) até Guararema (SP)

A modelagem também foi efetuada separadamente para as estações de compressão, pontos de entrega de gás, válvulas de bloqueio e pontos de recebimento de gás. No caso do transporte a Simulação Monte Carlo das falhas foi executada simultaneamente para as estações de compressão, pontos de entrega de gás e válvulas de bloqueio do gasoduto, de modo a subsidiar a execução da aplicação de programação linear com função objetivo de minimização de perdas de receitas e multas contratuais a que se expõe o Transportador.

No caso das válvulas de bloqueio e dos pontos de entrega de gás, por não ser viável técnica e economicamente a instalação de redundância, concentrou-se na avaliação do impacto das falhas na capacidade firme do gasoduto com vistas a subsidiar orientações a serem adotadas em novos projetos de gasodutos.

As simulações foram efetuadas segundo os seguintes parâmetros:

Softwares:	Microsoft Excel, @RISK 4.5
Número de iterações:	5110
Tipo de Amostragem:	Hipercubo Latino
Semente do Gerador Randômico:	Fixa e igual a 1
Recálculo padrão:	Valor Esperado
Coletânea de Amostras de Distribuição:	todas

As 5110 iterações para cada cenário simulado foram convertidas em histogramas com as frequências de cada tipo de falha obtida pela simulação Monte Carlo. Com a identificação das falhas e suas frequências procedeu-se às simulações termohidráulicas de cada uma delas e, então, pode-se avaliar o impacto anual das falhas sobre a capacidade de transporte do sistema e, na seqüência, foi elaborada a avaliação econômica do nível de redundância a ser adotado para o sistema de transporte.

As tabelas (4, 5, 6 e 7) e (8, 9, 10 e 11) apresentam os resultados da simulação Monte Carlo para as seguintes condições:

- Sistema GTB, lado boliviano.
  - (a) sem unidades compressoras reservas,
  - (b) com 2 unidades reservas
  - (c) com 4 unidades reservas
- Sistema TBG, lado brasileiro.
  - (i) sem unidades compressoras reservas,
  - (ii) com 5 unidades reservas
  - (iii) com 10 unidades reservas, para o caso da TBG.

Tabela 4 - Resultado das Simulações Monte de Carlo Para Avaliação da Disponibilidade do Sistema de Transporte da GTB – Sem Unidades Compressor Reservas

Falhas, Unidades por Estação	Ocorrências Falhas dias/Ano	Capacidade, MMm3/d	Estações de Compressão No. # / Ocorrência de Falhas			
			#1	#2	#3	#4
0	203.43	30.08				
1	138.14	24.60 24.90 25.00 25.20	40.3	35.1	31.3	31.5
2	7.07	24.60 24.90 25.00 25.20	1.8	1.9	1.6	1.8
1 (Contigua)	16.36	20.10 20.45 20.77	#1 & #2 6.8	#2 & #3 5.1	#3 & #4 4.4	
Total, dias	365.00					
Capacidade média		27.5868				
Capacidade firme contratual		30.08				
Disponibilidade		0.9171				

Tabela 5 – Resultado das Simulações Monte de Carlo Para Avaliação da Disponibilidade do Sistema de Transporte da GTB – Com 2 Unidades Compressor Reservas

Falhas, Unidades por Estação	Ocorrências Falhas dias/Ano	Capacidade, MMm3/d	Estações de Compressão No. # / Ocorrência de Falhas			
			#1	#2	#3	#4
0	269.64	30.08				
1	86.07	24.60 24.90 25.00 25.20	1.6	1.5	41.4	41.5
2	3.57	24.60 24.90 25.00 25.20	0.0	0.0	1.8	1.8
1 (Contigua)	5.71	20.10 20.45 20.77	#1 & #2 0.0	#2 & #3 0.4	#3 & #4 5.4	
Total, dias	365.00					
Capacidade média		28.7078				
Capacidade firme contratual		30.08				
Disponibilidade		0.9544				

Tabela 6 – Resultado das Simulações Monte de Carlo Para Avaliação da Disponibilidade do Sistema de Transporte da GTB – Com 4 Unidades Compressor Reservas

Falhas, Unidades por Estação	Ocorrências Falhas dias/Ano	Capacidade, MMm3/d	Estações de Compressão No. # / Ocorrência de Falhas			
			#1	#2	#3	#4
0	357.93	30.08				
1	7.07	24.60	1.8			
		24.90		1.9		
		25.00			1.6	
		25.20				1.8
2	0.00	24.60	0.0			
		24.90		0.0		
		25.00			0.0	
		25.20				0.0
1 (Contigua)	0.00	20.10	#1 & #2	#2 & #3	#3 & #4	
		20.45	0.0			
		20.77		0.0	0.0	
Total, dias	365.00					
Capacidade média		29.9801				
Capacidade firme contratual		30.08				
Disponibilidade		0.9967				

Tabela 7 – Resultados das Simulações Monte de Carlo para avaliação da disponibilidade do Sistema da Transporte da TBG – Sem Unidades Compressor Reservas

Falhas, Unidades por Estação	Ocorrências Falhas dias/Ano	Capacidade, MMm3/d	Estações de Compressão No. # / Ocorrências de Falhas										
			#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	
0	86.43	30.08											
1	214.86	25.90	36.1										
		26.10		31.6									
		26.70			29.1								
		26.70				24.5							
		27.20					19.2						
		27.50						19.1					
		28.70							17.6				
		29.80								14.2			
29.30									12.3				
25.80										11.2			
2	17.58	25.90	1.8										
		26.10		1.9									
		26.70			1.7								
		26.70				1.7							
		27.20					1.8						
		27.50						1.7					
		28.70							1.7				
		29.80								1.6			
29.30									1.7				
25.80										1.9			
1 Contigua	46.14	21.60	5&6	6&7	7&8	8&9	9&10	10&11	11&12	12&13	13&14		
		21.70	5.9										
		21.90		5.1									
		22.00			5.1								
		23.00				5.4							
		23.70					5.9						
		24.40						4.3					
		24.90							5.2				
21.90								4.1		5.1			
Total, dias	365												
Capacidade média		27.2403											
Capacidade firme contratual		30.08											
Disponibilidade		0.9056											

Tabela 8 - Resultado das Simulações Monte de Carlo Para Avaliação da Disponibilidade do Sistema de Transporte da TBG – Com 5 Unidades Compressor Reservas

Falhas, Unidades por Estação	Ocorrências Falhas dias/Ano	Capacidade, MMm3/d	Estações de Compressão No. # / Ocorrências de Falhas												
			#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14			
0	172.93	30.08													
1	160.79	25.90	1.6												
		26.10	1.6												
		26.70		1.5											
		26.70			1.4										
		27.20				1.4									
		27.50					39.3								
		28.70						33.9							
		29.80							30.0						
		29.30								25.3					
		25.80									24.9				
2	9.07	25.90	0.0												
		26.10		0.0											
		26.70			0.0										
		26.70				0.0									
		27.20					0.0								
		27.50						1.8							
		28.70							1.9						
		29.80								1.8					
		29.30									1.8				
		25.80										1.8		1.9	
1 Contígua	22.21	21.60	5&6	6&7	7&8	8&9	9&10	10&11	11&12	12&13	13&14				
		21.70	0.0												
		21.90		0.0											
		22.00			0.1										
		23.00				0.0									
		23.70					0.3								
		24.40						5.5							
		24.90							5.7						
		21.90								5.0					
												5.6			
Total, dias	365.00														
Capacidade média		28.7957													
Capacidade firme contratual		30.08													
Disponibilidade		0.9573													

Tabela 9 - Resultado das Simulações Monte de Carlo Para Avaliação da Disponibilidade do Sistema de Transporte da TBG – Com 10 Unidades Compressor Reservas

Falhas, Unidades por Estação	Ocorrências Falhas dias/Ano	Capacidade, MMm3/d	Estações de Compressão No. # / Ocorrências de Falhas											
			#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14		
0	347.43	30.08												
1	17.50	25.90	1.8											
		26.10		1.9										
		26.70			1.7									
		26.70				1.7								
		27.20					1.8							
		27.50						1.7						
		28.70							1.7					
		29.80								1.6				
		29.30									1.7			
		25.80										1.7		1.9
2	0.00	25.90	0.0											
		26.10		0.0										
		26.70			0.0									
		26.70				0.0								
		27.20					0.0							
		27.50						0.0						
		28.70							0.0					
		29.80								0.0				
		29.30									0.0			
		25.80										0.0		0.0
1 Contígua	0.07	21.60	5&6	6&7	7&8	8&9	9&10	10&11	11&12	12&13	13&14			
		21.70	0.0											
		21.90		0.0										
		22.00			0.1									
		23.00				0.0								
		23.70					0.0							
		24.40						0.0						
		24.90							0.0					
		21.90								0.0				
											0.0			
Total, dias	365.00													
Capacidade média		29.9466												
Capacidade firme contratual		30.08												
Disponibilidade		0.9956												

Tais tabelas apresentam na primeira coluna as condições de falhas de 0 (nenhuma unidade), 1 e 2 unidades compressoras por estação de compressão, bem como a condição de falha de 1 unidade em uma dada estação seguida da falha simultânea de uma outra unidade na estação de compressão seguinte (contígua). A segunda coluna apresenta a frequência, em dias por ano, para o inteiro conjunto de estações de compressão. A terceira coluna apresenta a capacidade de transporte que se pode manter para cada condição de falha obtida da simulação termohidráulica. A quarta coluna apresenta a frequência de falhas para cada condição e para cada estação de compressão. Considerando apenas as falhas de unidades compressoras das estações de compressão a capacidade média, em MMm<sup>3</sup>/d, é obtida através do somatório da multiplicação de cada capacidade pela ocorrência de falhas para cada estação dividido pelo total de dias do ano.

A disponibilidade do sistema de transporte pode ser determinada dividindo-se a capacidade média pela capacidade firme contratada do gasoduto para os lados boliviano e brasileiro. A exposição ao risco de não se atender a capacidade firme contratada de 30.08 MMm<sup>3</sup>/d para cada alternativa de instalação de unidades compressoras reservas para os lados boliviano e brasileiro podem ser observadas nas figuras 20 e 21 que apresentam uma curva de capacidade versus probabilidade acumulada e onde fica evidente que a medida em que se instala mais unidades reservas reduz-se a probabilidade de se operar com capacidades inferiores à contratada. A disponibilidade média para cada caso, considerando a quantidade de unidades reservas instaladas, é apresentadas abaixo.

#### Lado boliviano – GTB

- Sem unidades reservas: 0.9171
- Com 2 unidades reservas: 0.9544
- Com 4 unidades reservas: 0.9967

#### Lado brasileiro – TBG

- Sem unidades reservas: 0.9056
- Com 5 unidades reservas: 0.9573
- Com 10 unidades reservas: 0.9956

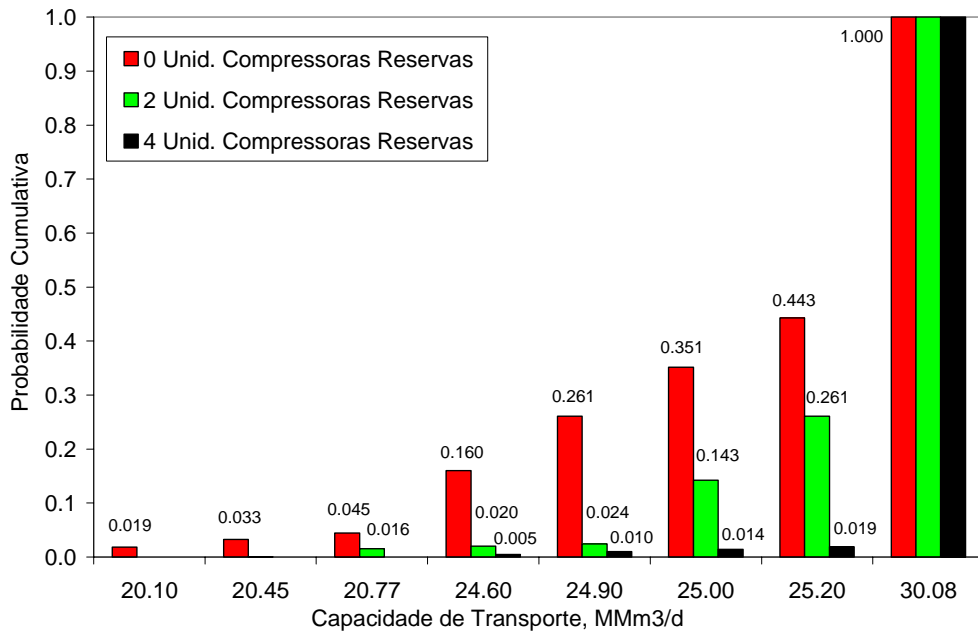


Figura 20 - Curva de Capacidade de Transporte versus Probabilidade Acumulada Lado Boliviano –GTB

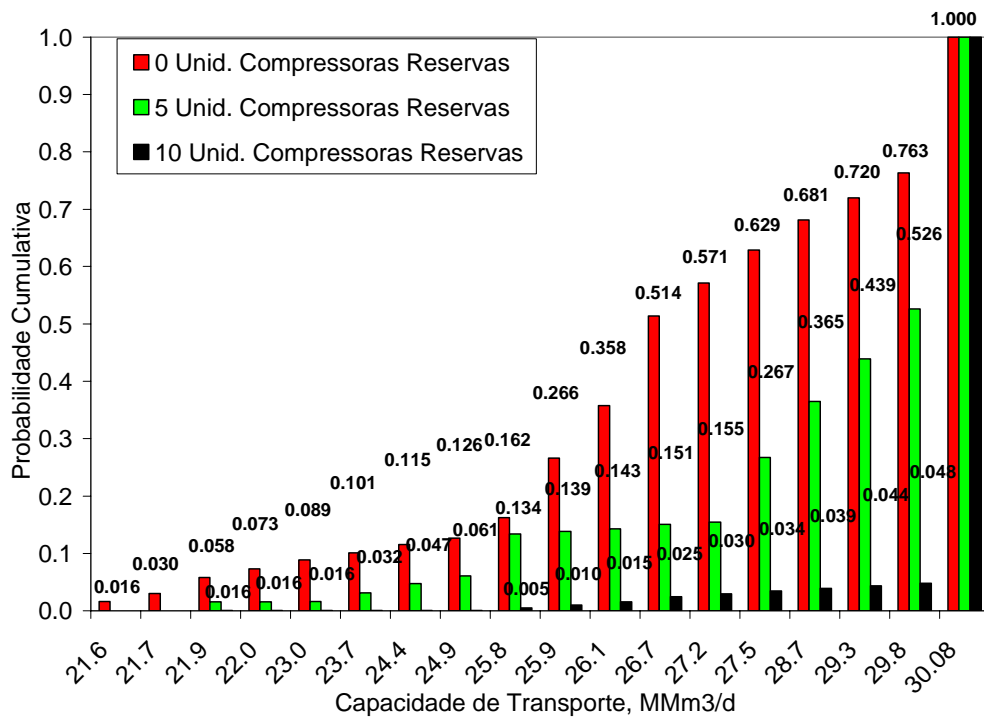


Figura 21 - Curva de Capacidade de Transporte versus Probabilidade Acumulada Lado Brasileiro –TGB

A instalação de unidades reservas foi considerada iniciando-se na primeira estação de compressão de cada lado do gasoduto: estação #1, do lado boliviano e

estação #5, do lado brasileiro. Tal decisão justifica-se devido ao efeito do gás combustível que diminui a vazão de gás transportado da origem do gasoduto em direção a outra extremidade do gasoduto (mercado consumidor).

## 7.1 Simulação termohidráulica

As simulações termo hidráulicas foram baseadas no modelo do Gasbol que incorpora todas as características físicas da malha de gasodutos tais como dutos, válvulas, reguladores de pressão, resfriadores de gás, compressores centrífugos e turbinas a gás além das características geográficas e ambientais como o perfil de elevação do terreno ao longo da rota do gasoduto e as temperaturas do solo e do ar atmosférico. Os mapas de desempenho termodinâmicos dos compressores centrífugos e das turbinas a gás também são considerados no modelo do gasoduto, de modo a representar o mais de perto possível o sistema como instalado e, dessa forma, obter resultados da simulação que permitam suportar o processo de tomada de decisão de forma precisa e antecipada. Os cenários simulados devem atender condições de contorno obedecendo a requisitos de pressão mínima e volumes de gás na entrega do gás ao Distribuidor. A figura 22 apresenta a malha do Gasbol com alguns pontos extremos onde as variáveis de pressão e vazão de gás são apresentadas graficamente como resultado da simulação em regime transiente.

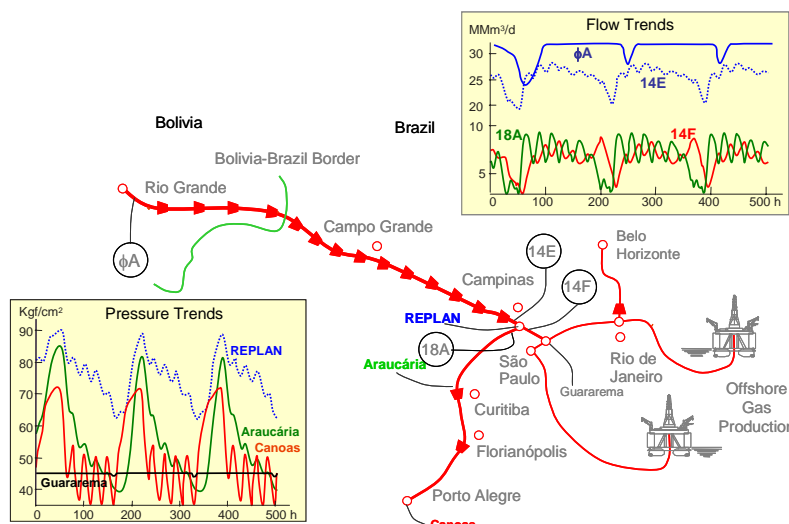


Figura 22 - Gasoduto Gasbol com Variáveis de Pressão e Vazão

As simulações termohidráulicas para falhas de unidades compressoras das estações de compressão do gasoduto foram efetuadas em regime permanente pois as falhas, que normalmente causam parada dessas unidades, requerem um tempo



de intervenção da equipe de manutenção que pode requerer alguns dias, dependendo de sua gravidade, caracterizando um comportamento em regime permanente enquanto durar o evento de falha, daí a necessidade de se instalar unidades compressoras reservas.

No caso de fechamento indevido de válvulas de bloqueio, o tempo médio de intervenção para se restabelecer a condição operacional é de cerca de 4 horas, como verificado junto a TBG, que opera o Gasbol. Nesse caso a simulação em regime transiente permite a utilização do inventário de gás (*linepack*) armazenado nos trechos do gasoduto de modo a mitigar o efeito das falhas na capacidade de transporte e entrega de gás ao Distribuidor.

As falhas nos pontos de entrega de gás não requerem simulação termohidráulica pois não reduzem a capacidade de transporte mas apenas a entrega de gás ao Distribuidor.

### **7.1.1 Modelo de dados dos resultados**

Os cenários de falhas de unidades compressoras, válvulas de bloqueio, pontos de recebimento e entrega de gás natural foram modelados e simulados termohidráulicamente, em regime transiente, de modo a identificar seus impactos no transporte de gás e na sua efetiva entrega ao Distribuidor.

Com vistas a manter um histórico de todos os resultados das simulações bem como permitir elaboração de estudos comparativos dos resultados foi elaborado um modelo de dados abrangendo todos os cenários simulados contendo os valores temporais das variáveis relacionadas com o processo de transporte.

Tal abordagem também propicia que estudos adicionais a serem realizados para cenários futuros, ao longo da vida operacional do gasoduto, sejam executados de forma estruturada valendo-se de toda metodologia e recursos aqui desenvolvidos. Outras análises, além daquelas consideradas neste trabalho, poderão ser efetuadas sobre a base de dados produzida destas simulações com ganhos significativos de tempo de realização e qualidade.

O método adotado para a concepção do banco de dados considerou a elaboração do (1) modelo conceitual, do (2) modelo lógico e do (3) modelo físico. Utilizou-se o software Microsoft Visio 2007 que apresenta a característica de

permitir a exportação do modelo conceitual para o lógico e desse para o físico, gerando o arquivo mdb do Microsoft Access.

Com os resultados obtidos a partir das simulações termohidráulicas efetuadas para os diversos cenários de falhas por fechamento acidental de válvulas de bloqueio, instaladas ao longo de toda a extensão do gasoduto, em intervalos regulares que variam de 16 a 32 km, foi desenvolvido um sistema de visualização dos resultados, através da manipulação dos dados produzidos. Para suportar tal atividade de modo sistematizado, foi concebido um modelo de dados relacional para armazenar todas as informações geradas pelo processo de simulação termohidráulica.

O simulador termo-hidráulico gera um arquivo de resultado das simulações transiente no formato texto (ASCII, extensão TGW), cuja manipulação dos dados gerados não é de fácil manuseio.

A estrutura dos dados resultados da simulação foi modelada de modo a produzir um banco de dados contendo todos os cenários simulados, concentrando-se naqueles pertinentes às funções do SGLT.

Os atributos incorporados ao modelo e necessários à análise são descritos abaixo:

- Componente *Supply* (Fornecimento de Gás):
  - Name (Nome)
  - Pressure (Pressão)
  - Flow (Vazão)
  - Accumulated Volume (Volume)
  - Heating Value (Calor Específico)
- Componente *Delivery* (Pontos de Entrega de Gás):
  - Name (Nome)
  - Pressure (Pressão)
  - Flow (Vazão)
  - Accumulated Volume (Volume)
  - Heating Value (Calor Específico)
- Componente *Valve* (Válvula):
  - Name (Nome)
  - UP\_Press (Pressão de Entrada)
  - DN\_Press (Pressão de Saída)

- Flow (Vazão)
- % Open (Porcentagem de Abertura da Válvula)
- Componente *Pipe* (Tubos):
  - Name (Nome)
  - UP\_Press (Pressão de Entrada)
  - DN\_Press (Pressão de Saída)
  - UP\_Temperature (Temperatura de Entrada)
  - DN\_Temperature (Temperatura de Saída)
  - UP\_Flow (Vazão de Entrada)
  - DN\_Flow (Vazão de Saída)
  - UP\_Velocity (Velocidade do Gás na Entrada)
  - DN\_Velocity (Velocidade do Gás na Saída)
  - Inventory (Line Pack – Inventário)
- Componente *Compressor* (Compressor):
  - Name (Nome)
  - UP\_Press (Pressão de Entrada)
  - DN\_Press (Pressão de Saída)
  - UP\_Temperature (Temperatura de Entrada)
  - DN\_Temperature (Temperatura de Saída)
  - Flow (Vazão)
  - Actual Flow (Vazão Atual)
  - Accumulated Volume (Volume Acumulado)
  - Power (Potência)
  - Speed (Velocidade)
  - Head (Trabalho)
  - Pressure Difference (Ratio – Razão de Compressão)
  - Status (Status do Compressor)

Com tais componentes, seus respectivos atributos e relacionamentos com os cenários simulados, foi concebido o modelo conceitual, como representado na figura 23. Adotou-se a tecnologia ORM (Object-Role Modeling). A partir do modelo conceitual foi possível sua conversão através da ferramenta CASE, Microsoft Visio Enterprise Architect, para modelo lógico (figura 24) e desse para modelo físico em Microsoft Access.

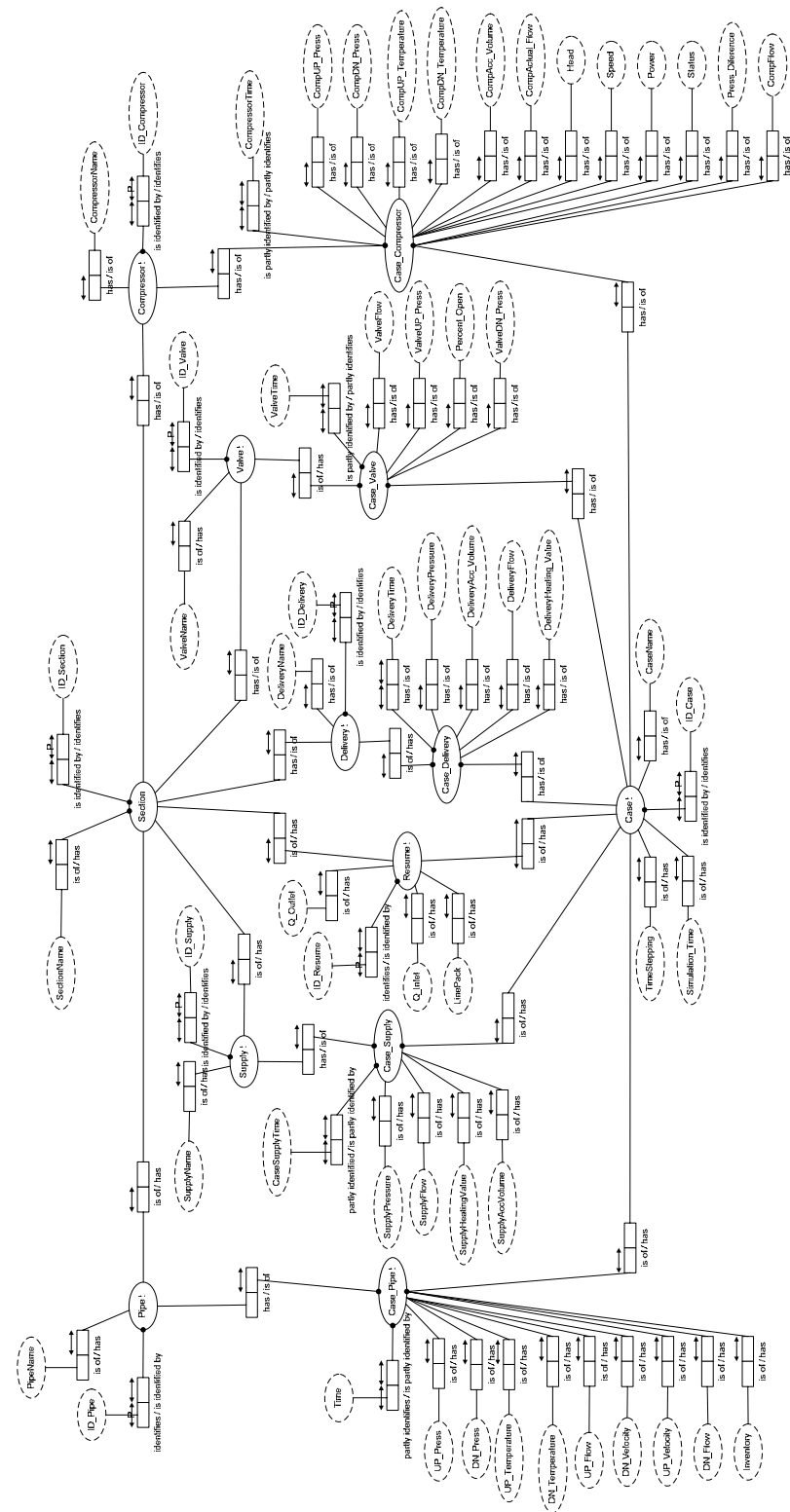


Figura 23 - Modelo Conceitual ORM dos Resultados das Simulações Termohidráulicas das Falhas de Válvulas de Bloqueio

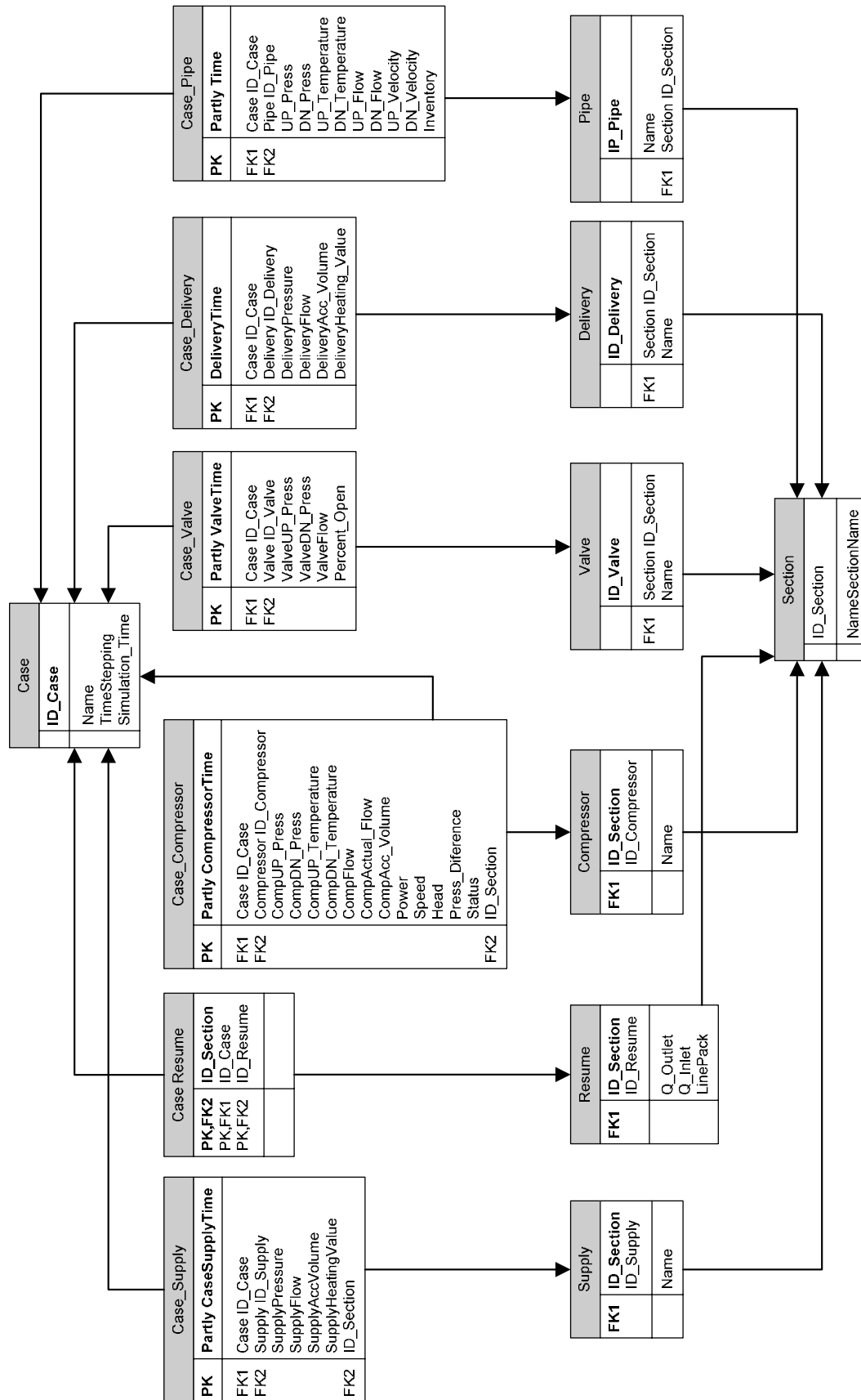


Figura 244 - Modelo Lógico dos Resultados das Simulações Termohidráulicas das Falhas de Válvulas de Bloqueio

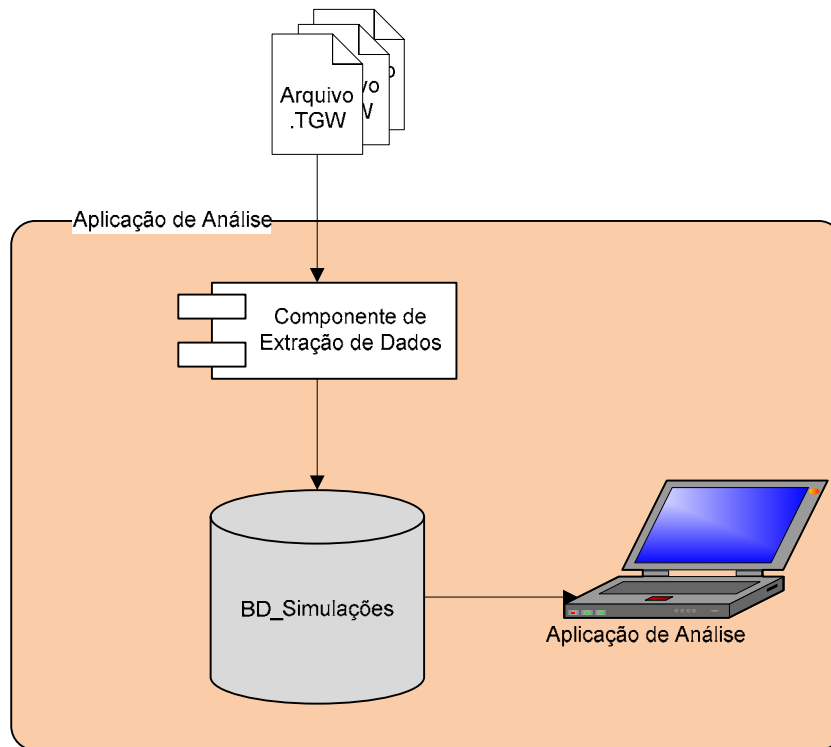


Figura 25 - Arquitetura do Sistema de Cadastramento

Para a extração dos dados dos arquivos de saída (ASCII, extensão TGW) do simulador termo-hidráulico foi desenvolvida uma aplicação, em Visual Studio 2005, para leitura, extração e cadastramento para todos os cenários considerados, constituindo, dessa forma, o banco de dados de resultados das simulações. Desta forma é possível manipular estes dados através de consultas utilizando-se a linguagem SQL.

A figura 25 apresenta a arquitetura do sistema de cadastramento de dados dos resultados das simulações termohidráulicas.

### 7.1.2 Análise dos resultados das simulações

Para o desenvolvimento do sistema de análise dos resultados das simulações termohidráulicas, foram utilizadas as técnicas de engenharia de software e padrões de modelagem, recomendadas pelo padrão UML (Unified Modeling Language). A adoção dessa técnica permite a sistematização do processo de desenvolvimento da aplicação e a otimizando das diversas fases de desenvolvimento até sua efetiva implantação.

Foi elaborada uma lista de requisitos para a Aplicação de Análise de Resultados das Simulações, que requer o atendimento às seguintes características fundamentais:

- R1. Cadastrar dados de arquivos (ASCII, extensão WTG) gerados das simulações termohidráulicas;
- R2. Manipular todas as informações, relativas a cada variável (atributo) do modelo termohidráulico de cada cenário a ser analisado, relacionadas com os componentes (objetos) da malha de gasodutos (Suprimento, Pontos de Entrega, Tubos, Válvulas, Compressores, etc.);
- R3. Permitir que o usuário (analista) gere gráficos com os valores resultantes das simulações, possibilitando análise do comportamento da malha de gasodutos sob diferentes cenários, de modo a comparar seus resultados.
- R4. Permitir exportação de resultados para alimentar outros processos e aplicações que compõem o SGLT;
- R5. Permitir a visualização de todos os objetos cadastrados segundo critério de pesquisa estabelecido pelo usuário (execução de *queries* SQL).
- R6. Ser capaz de imprimir todos os gráficos criados pelo usuário.
- R7. O sistema deve, em ambiente colaborativo e corporativo, permitir a consulta em diferentes bancos de dados (mesmo modelo) de simulações.
- R8. O sistema deve ser concebido com interface amigável, de simples utilização e não requerer treinamento extensivo do usuário.

A partir destes requisitos foi elaborado o Diagrama de Casos de Uso, apresentado na figura 26 e o Diagrama de Classes de objetos, apresentadas na figura 27.

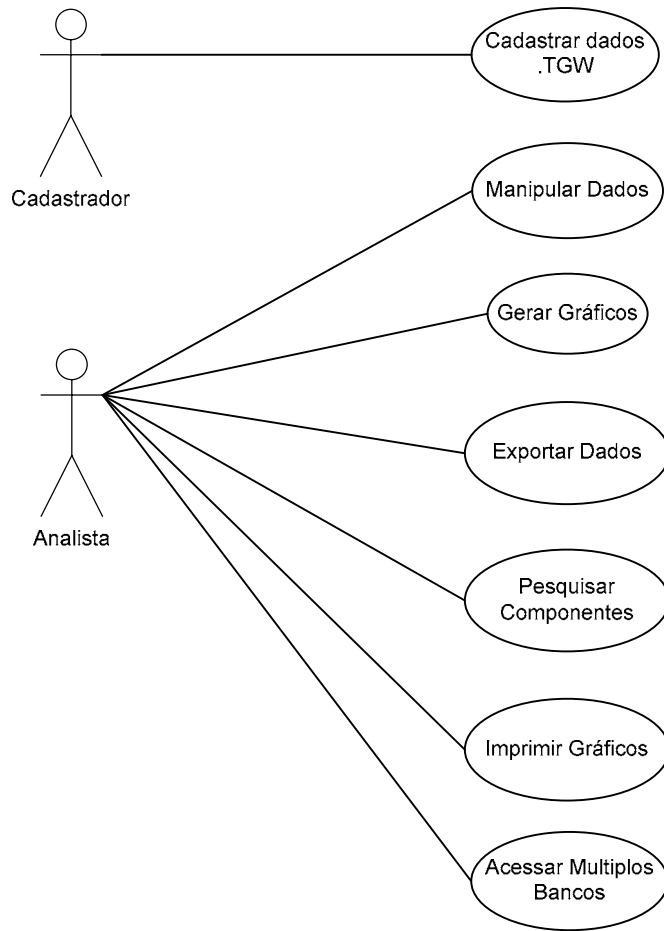


Figura 26 - Diagrama de Casos de Uso



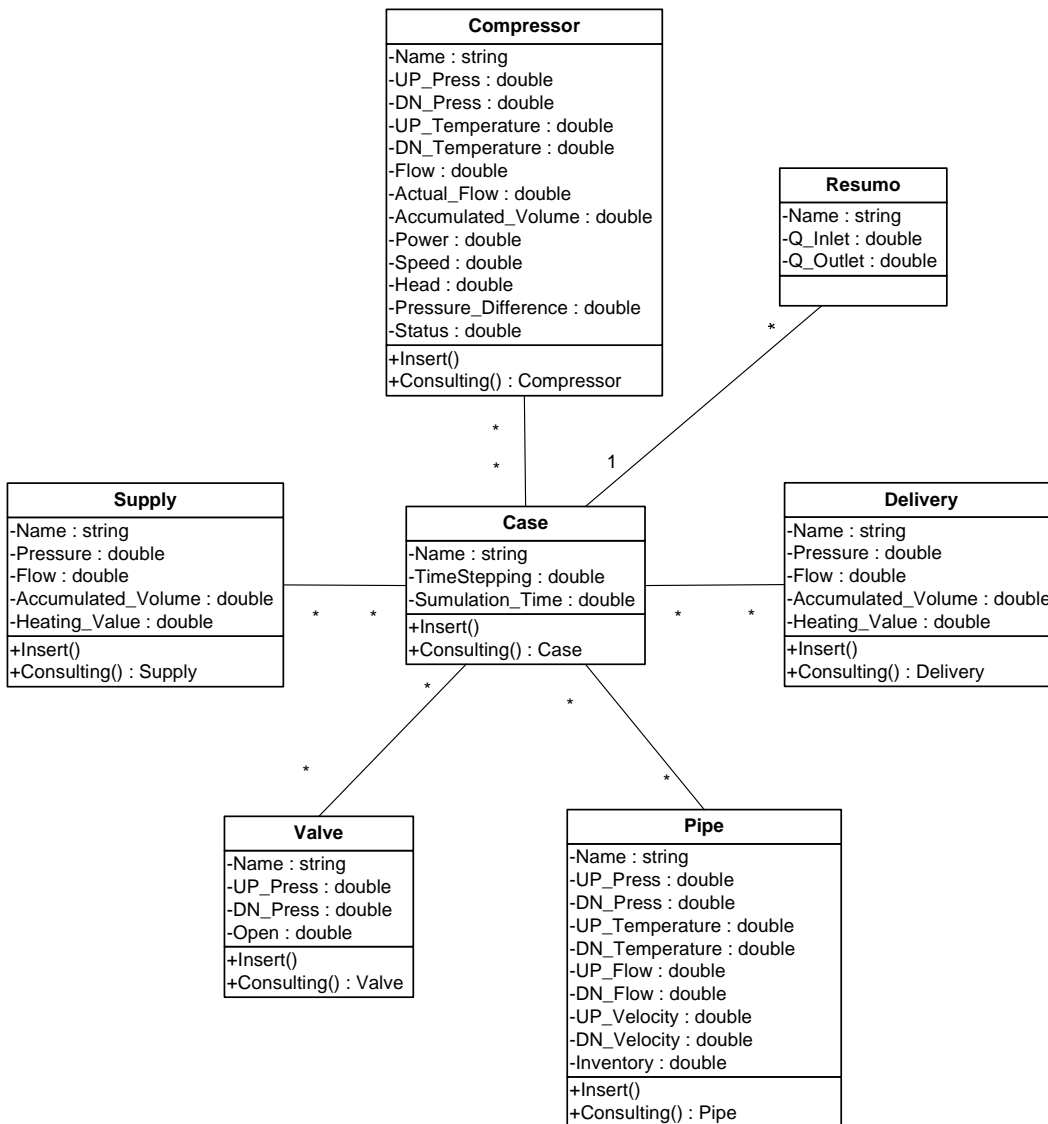


Figura 27 – Diagrama de Classes de Objetos