UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA
Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos
e Bioquímicos

UMA METODOLOGIA MONTE CARLO PARA PROJETO DE PROCESSAMENTO OFFSHORE DE GÁS NATURAL

Cristiane São Bento Gonzaga

Rio de Janeiro
2014

Uma Metodologia Monte Carlo para Projeto de Processamento Offshore de Gás Natural

Cristiane São Bento Gonzaga

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau em Mestre em Engenharia Química.

Orientadores:

Prof. José Luiz de Medeiros, Ds.C
Profa. Ofélia de Queiroz F. Araújo, Ph.D.

Rio de Janeiro

2014

Uma Metodologia Monte Carlo para Projeto de Processamento Offshore de Gás Natural

Cristiane São Bento Gonzaga

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau em Mestre em Engenharia Química.

Aprovada por:

_____
Prof. José Luiz de Medeiros, Ds.C.

_____
Profa. Ofélia de Queiroz F. Araújo, Ph.D.

_____
Prof. Amaro Gomes Barreto Junior, Ds.C.

_____
Carlos Eduardo Fontes, Ds.C.

_____
Wilson Mantovani Grava, Ds.C.

Rio de Janeiro

2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Gonzaga, Cristiane São Bento.
Uma Metodologia Monte Carlo para Projeto de Processamento Offshore de Gás Natural / Cristiane São Bento Gonzaga. – 2014.

XVIII, 148 p.: il.; 29,7 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Rio de Janeiro, 2014.

Orientadores: José Luiz de Medeiros e Ofélia de Queiroz F. Araújo

1. Metodologia Monte Carlo. 2. Processamento de Gás Natural. 3. Engenharia Auxiliada por Computação. 4. Simulador de Processo. I. de Medeiros, José Luiz; Araújo, Ofélia de Queiróz F. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola de Química. III. Título.

“As pessoas mais felizes não tem as melhores coisas. Elas sabem fazer o melhor das oportunidades que aparecem em seus caminhos.”

Clarisse Lispector

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, de alguma maneira, contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação, com sugestões e palavras de incentivo.

Agradeço à Chemtech Serviços de Engenharia e Software por reconhecer a importância da especialização e capacitação dos funcionários e viabilizar o Mestrado *In-Company*.

Agradeço aos meus orientadores José Luiz de Medeiros e Ofélia de Queiróz F. Araújo pela orientação técnica, compartilhamento dos seus conhecimentos e também por acreditar na ideia de desenvolver algo novo nesta dissertação.

Agradeço à minha família e aos meus amigos por todo o incentivo ao longo do desenvolvimento desta dissertação e também pela compreensão nos momentos em que precisei estar ausente e focada.

Agradeço especialmente aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado, me suportando e acompanhando o meu crescimento profissional.

Resumo da Dissertação apresentada ao TPQBq/EQ/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

UMA METODOLOGIA MONTE CARLO PARA PROJETO DE PROCESSAMENTO OFFSHORE DE GÁS NATURAL

Cristiane São Bento Gonzaga

Março/2014

Orientadores: José Luiz de Medeiros

Ofélia de Queiroz F. Araújo

Nos últimos anos, o consumo de gás natural, considerado o mais limpo dos combustíveis fósseis, vem crescendo cada vez mais. Mundialmente este consumo é maior do que 3,3 trilhões de metros cúbicos por ano. No Brasil, em que o consumo é em torno de 29,2 milhões de metros cúbicos por ano, são grandes os investimentos para processamento de gás natural associado a petróleo, particularmente em recentes campos *offshore*. No entanto, muitas são as incertezas no que diz respeito à produção e processamento de gás natural em ambiente *offshore*: desde flutuações de condições de carga, de preço e de mercado consumidor do gás a flutuações de custos de equipamentos, de custos de utilidades, de eventos meteorológicos em alto mar e até aos grandes riscos operacionais de dispositivos submarinos e de processos embarcados. Estas enormes incertezas recomendam que o dimensionamento do processamento *offshore* de gás natural utilize técnicas de decisão sob influência de fatores probabilísticos. Uma técnica poderosa para decisão em cenário não-determinístico é conhecida como Método de Monte Carlo (MMC). Utilizando técnicas avançadas de Engenharia Auxiliada por Computação, este trabalho apresenta uma metodologia Monte Carlo para projeto de processamento *offshore* de gás natural através do desenvolvimento de uma ferramenta computacional VB-XML que age integrada ao simulador de processos HYSYS e ao software MATLAB para geração e análise de amostragem de respostas do processo frente a cenários probabilísticos criados em batelada. Esta amostragem de desempenhos permite que o processo proposto seja avaliado estatisticamente. Para demonstração da metodologia Monte Carlo aqui proposta, foi realizado o dimensionamento de um processo *offhsore* de condicionamento de gás natural com vazão de carga probabilística segundo um padrão normal. O critério de aprovação de um projeto estipula que este tenha capacidade para cumprir todas as especificações de processo em pelo menos 75% dos casos amostrados em MC.

Abstract of Dissertation presented to TPQBq/EQ/UFRJ as a partial fullfilment of the requirements for the degree of Master of Sciences (M.Sc.)

A MONTE CARLO METHODOLOGY FOR DESIGN OF NATURAL GAS OFFSHORE PROCESSING

Cristiane São Bento Gonzaga

March/2014

Advisors: José Luiz de Medeiro

Ofélia de Queiroz F. Araújo

In recent years, the consumption of natural gas, considered the cleanest fossil fuel, is increasingly growing. In global terms this consumption is greater than 3.3 trillion cubic meters per year. In Brazil, where consumption is approximately 29.2 million cubic meters per year, investments for processing natural gas associated with oil are being made in great scale, particularly in recent offshore fields. However, many are the uncertainties regarding natural gas production and processing at offshore conditions: from fluctuations of gas feed conditions, of price and of consumer gas market to fluctuations of utilitiy costs, of equipment costs, of meteorological marine events and to big operational risks in sub-sea facilities and offshore rigs. Such huge uncertainties recommend that the design of offshore units of natural gas processing adopts techniques of decision under influence of stochastic factors. A powerful technique for decision under non deterministic scenarios is known as the Monte Carlo Method (MCM).

By using advanced techniques from the field of Computer-Aided Engineering, this work presents a Monte Carlo methodology for designing natural gas offshore processing via the development of a VB-XML computational tool that acts integrated with the process simulator HYSYS and with the software MATLAB for generation and analysis of sampling of the process response under stochastic scenarios created in batch mode. This sampling of performances allows a criterion to evaluate the process in statistical grounds. To demonstrate the proposed Monte Carlo methodology, it was executed the sizing of a natural gas offshore processing assuming a probabilistic feed flow rate following a Normal pattern. The criterion for approval of a design stipulates that it must have capacity to accomplish all process specifications for at least 75% of the cases in the MC sampling.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. Motivações 2
1.2. Objetivos 3
1.3. Esboço desta Dissertação 4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5
2.1. Processamento de Gás Natural 5
2.1.1. Introdução 5
2.1.2. Desidratação do Gás Natural 9
2.1.3. Remoção de CO_2 do Gás Natural 12
2.2. Engenharia Auxiliada por Computação e Simulação de Processos 17
2.2.1. O *Software* HYSYS e sua API 19
2.2.2. Linguagem *Visual Basic* (VB) 21
2.2.3. Linguagem XML 23
2.3. Metodologia de Monte Carlo 24
2.3.1. Método da Transformação Inversa 26
2.3.2. Geração de Populações Normais Pseudo-Randômicas 28
3. SIMULAÇÃO DE PROCESSAMENTO OFFSHORE DE GÁS NATURAL 31
3.1.1. Diagrama de Blocos 31
3.1.2. Especificações do Gás Natural 32
3.1.3. Requisitos para Meio Ambiente, Segurança Operacional e Análise de Risco 32
3.1.4. Definição das Variáveis de Monte Carlo 32
3.1.5. Simulação do Caso Base no Software HYSYS 34
3.1.6. Simulações em Batelada 41
3.1.6.1. Composição do Gás Natural 42
3.1.6.2. Dimensionamentos Fixos 42
4. DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÕES EM BATELADA E ANÁLISE DE MONTE CARLO 44
4.1. Módulo de Geração de Dados em Batelada no HYSYS 45
4.1.1. Leitura do Arquivo XML de Parâmetros de Configuração 48
4.1.1.1. Configuração do Arquivo XML 48
4.1.1.2. Leitura do Arquivo XML 58
4.1.2. Geração de Números Aleatórios e Geração de Distribuições Normais 59
4.1.3. Cálculo das Expressões 60
4.1.4. Geração da Matriz de MC, Arquivo XML com Distribuição Normal, PDFs e Histogramas das Variáveis de Entrada 61

4.1.5. Múltiplas Simulações: Escrita de Dados no HYSYS, Leitura do XML da Biblioteca de Leitura e Geração de Arquivo XML de Saída 64
4.1.5.1. Arquivo XML da Biblioteca de Leitura 65
4.1.5.2. Arquivo XML de Saída 70
4.1.5.3. Leitura do Arquivo de XML com Biblioteca de Leitura e Escrita do Arquivo XML com Dados de Saída da Simulação 72
4.2. Módulo de Análise de Monte Carlo 75
4.2.1. Arquivo XML de Parâmetros da Análise de MC 77
4.2.2. Arquivo XML de Saída da Análise de Monte Carlo 80
5. ANÁLISE DE MONTE CARLO E RESULTADOS 83
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES 104
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 106
8. ANEXOS 109
8.1. Sumários de Componentes da Simulação Base do HYSYS 109
8.2. Arquivo XML de Parâmetros de Configuração 114
8.3. Arquivo Matlab para Geração de Curva PDF e Histograma de Dados de Entrada 124
8.4. Arquivo XML da Biblioteca de Leitura 130
8.5. Arquivo XML de Parâmetros da Análise de Monte Carlo 132
8.6. Arquivo Matlab para Geração de Curva PDF, Histograma e Estatísticas de Atendimento a Especificações de Dados de Saída 140

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de reservatórios de gás associado e de gás não associado 5
Figura 2. Formação de Petróleo e Gás Natural 6
Figura 3. Consumo Final de Energia por Fonte no Brasil no Ano Base de 2012.....9
Figura 4. Esquema de Desidratação de Gás Natural por Absorção com TEG 10
Figura 5. Esquema de Desidratação de Gás Natural por Adsorção com Sólido Dessecante.....11
Figura 6. Esquema de Desidratação de Gás Natural por Resfriamento.....12
Figura 7. Processo Típico de Remoção de CO2 do Gás Natural por Absorvedor/Stripper Utilizando Aminas.....15
Figura 8. Estrutura de Membranas para Separações Gasosa.....16
Figura 9. Configurações de CO2 por Módulos de Membranas.....17
Figura 10. Conexão entre rnd1 e PDF(x1) via a equação rnd1 = CDF(x1)..... 27
Figura 11. Relações entre as Funções iCDF, CDF e PDF da Distribuição Normal.....30
Figura 12. Diagrama de Blocos para Processamento de Gás Natural.....31
Figura 13. PDF de Vazões do Gás Natural de Entrada (MMsd/m³). 34
Figura 14. PDF de Frações Molares de CO2 do Gás Natural de Entrada.....34
Figura 15. Etapa de Compressão do Gás Natural de Entrada.....36
Figura 16. Etapas de Absorção com TEG e regeneração de TEG.....37
Figura 17. Etapa de Separação de Condensáveis do Gás Natural Seco.....39
Figura 18. Etapa de Remoção de CO2 para Geração do Gás Natural Especificado.....40
Figura 19. Etapa de Compressão do CO2 até a Pressão de Reinjeção no Poço.....41
Figura 20. Interface Inicial da Ferramenta Computacional MCAnalysis.....44
Figura 21. Interface do Módulo de Geração de Dados em Batelada no HYSYS.....45
Figura 22. Algoritmo Geral do Módulo de Geração de Dados em Batelada.....46
Figura 23. Inicialização da Classe “GerarBateladaHysys”.....47
Figura 24. Estrutura de Nós do Arquivo XML de Configuração.....50
Figura 25. Estrutura de Nós de Variáveis do Tipo MC Diretas no XML de Configuração.....51
Figura 26. Variável Fração Molar de CO2 (MC Direta) no XML de Configuração.....53
Figura 27. Objeto e Propriedade Referente à Variável MC Direta “Fração Molar CO2” na Simulação HYSYS.....54
Figura 28. Estrutura de Nós de Variáveis do Tipo MC Indiretas no XML de Configuração.....54

Figura 29. Variável Vazão GN (MC Indireta) no XML de Configuração.....55
Figura 30. Estrutura de Nós de Variáveis do Tipo Expressão no XML de Configuração.....55
Figura 31. Variável Vazão Molar GN (Expressão) no XML de Configuração.....57
Figura 32. Variável Fração Molar de C1 (Expressão) no XML de Configuração.....58
Figura 33. Importação de Classes para a Ferramenta.....59
Figura 34. Algoritmo de Cálculo de Valores Aleatórios e Geração de Distribuições Normais.....60
Figura 35. Algoritmo de Cálculo das Expressões.....61
Figura 36. Algoritmo da Geração da Matriz de MC, Arquivo de XML contendo as Distribuições Normais e Arquivos Matlab para Geração de PDFs e Histogramas das Variáveis de Entrada.....62
Figura 37. Estrutura de Nós do Arquivo XML com Distribuições de Dados de Entrada.....62
Figura 38. Arquivo XML com Distribuições de Dados de Entrada.....63
Figura 39. Algoritmo de Escrita de Dados no HYSYS, Leitura do Arquivo XML da Biblioteca de Leitura e Escrita do Arquivo XML de Saída.....65
Figura 40. Estrutura de Nós do Arquivo XML da Biblioteca de Leitura de Dados.....66
Figura 41. Arquivo XML Simplificado da Biblioteca de Leitura de Dados.....68
Figura 42. Rotina “CalcularDP” para Cálculo do Ponto de Orvalho.....70
Figura 43. Estrutura de Nós do Arquivo XML de Saída.....71
Figura 44. Arquivo XML de Saída.....72
Figura 45. Algoritmo de Escrita de Dados no HYSYS, Leitura do Arquivo XML da Biblioteca de Leitura e Escrita do Arquivo XML de Saída.....74
Figura 46. Interface do Módulo de Geração da Análise de Monte Carlo.....75
Figura 47. Algoritmo Geral do Módulo de Geração da Análise de Monte Carlo.....75
Figura 48. Inicialização da Classe “GerarAnaliseMC”.....76
Figura 49. Estrutura de Nós do Arquivo XML de Parâmetros da Análise de MMC.....77
Figura 50. Estrutura de Nós da Variável do Tipo HYSYS Direta no Arquivo XML de Parâmetros da Análise de MMC.....78
Figura 51. Variável do Tipo HYSYS Direta no Arquivo XML de Parâmetros da Análise de MMC.....79
Figura 52. Estrutura de Nós da Variável do Tipo Expressão no Arquivo XML de Parâmetros da Análise de MMC.....79
Figura 53. Variável do Tipo Expressão no Arquivo XML de Parâmetros da Análise de MMC.....80

Figura 54. Estrutura de Nós do Arquivo XML de Saída da Análise de Monte Carlo.....81
Figura 55. Arquivo XML de Saída da Análise de Monte Carlo.....82
Figura 56. Histograma de Barras e Curva PDF da Vazão (MMsm³/d) do Gás Natural de Entrada.....83
Figura 57. Histograma de Barras e Curva PDF da Fração Molar de CO2 do Gás Natural de Entrada.....84
Figura 58. Histograma de Barras e Curva PDF da Vazão Molar do Gás Natural de Entrada.....84
Figura 59. Histograma de Barras e Curva PDF da Vazão Molar do Gás Natural de Entrada – População Amostrada = 100.....86
Figura 60. Histograma de Barras e Curva PDF da Vazão Molar do Gás Natural de Entrada – População Amostrada = 500.....86
Figura 61. Histograma de Barras e Curva PDF da Vazão Molar do Gás Natural de Entrada – População Amostrada = 1000.....86
Figura 62. Histograma de Barras e Curva PDF da Vazão Molar do Gás Natural de Entrada – População Amostrada = 1500.....86
Figura 63. Histograma de Barras e Curva PDF da Vazão Molar do Gás Natural de Entrada – População Amostrada = 10000.....87
Figura 64. Histograma de Barras e Curva PDF da Fração Molar de CO2 do Gás Natural Final.....89
Figura 65. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Fração Molar de CO2 do Gás Natural Final.....90
Figura 66. Histograma de Barras e Curva PDF do WDP do Gás Natural de Entrada.....91
Figura 67. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF do WDP do Gás Natural Final.....92
Figura 68. Histograma de Barras e Curva PDF do HCDP do Gás Natural de Entrada.....92
Figura 69. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF do HCDP do Gás Natural Final.....93
Figura 70. Histograma de Barras e Curva PDF da Fração Molar de C1 do Gás Natural Final.....94
Figura 71. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Fração Molar de C1 do Gás Natural Final.....94
Figura 72. Histograma de Barras e Curva PDF da Potência do Compressor Inicial.....96
Figura 73. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Potência do Compressor Inicial.....96

Figura 74. Histograma de Barras e Curva PDF da Potência do Compressor Após Desidratação do Gás Natural.....96
Figura 75. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Potência do Compressor Após Desidratação do Gás Natural.....96
Figura 71. Histograma de Barras e Curva PDF da Potência dos Compressores dos Cinco Estágios de Compressão do CO2.....97
Figura 72. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Potência dos Compressores dos Cinco Estágios de Compressão do CO2.....97
Figura 78. Histograma de Barras e Curva PDF da Potência do Trocador Inicial.....97
Figura 79. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Potência do Trocador Inicial.....97
Figura 80. Histograma de Barras e Curva PDF da Potência do Trocador Após Desidratação do Gás Natural.....98
Figura 81. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Potência do Trocador do Compressor Após Desidratação do Gás Natural.....98
Figura 82. Histograma de Barras e Curva PDF da Potência dos Trocadores dos Cinco Estágios de Compressão do CO2.....98
Figura 83. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Potência dos Trocadores dos Cinco Estágios de Compressão do CO2.....98
Figura 84. Histograma de Barras e Curva PDF da Potência do Resfriador da Coluna de Regeneração de TEG.....99
Figura 85. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Potência do Resfriador da Coluna de Regeneração de TEG.....99
Figura 86. Histograma de Barras e Curva PDF da Vazão Molar de Gás Natural Final.....99
Figura 87. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Vazão Molar de Gás Natural Final.....99
Figura 88. Histograma de Barras e Curva PDF da Fração Molar de C1 nos Pesados....100
Figura 89. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Fração Molar de C1 nos Pesados.....100
Figura 90. Histograma de Barras e Curva PDF da Vazão Molar de Pesados.....100
Figura 91. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Vazão Molar de Pesados.....100
Figura 92. Histograma de Barras e Curva PDF da Fração Molar de CO2 no CO2 para reinjeção.....101

Figura 93. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Fração Molar de CO2 no CO2 para reinjeção.....101
Figura 94. Histograma de Barras e Curva PDF da Vazão Molar de CO2 para reinjeção.....101
Figura 95. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Vazão Molar de CO2 para reinjeção.....101
.Figura 96. Histograma de Barras e Curva PDF da Fração Molar de CO2 do Gás Natural Final.....102
Figura 97. Histograma de Barras Acumulado e Curva CDF da Fração Molar de CO2 do Gás Natural Final.....103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composições (% Molar) Típicas do Gás Natural. 6
Tabela 2 – Aplicações Computacionais em Áreas da Engenharia. 18
Tabela 3 – Nomenclatura dos Componentes da Simulação no Software HYSYS. 34
Tabela 4 – Vazão e composição do gás natural de entrada. 35
Tabela 5 – Vazão e composição do gás natural de entrada. 42
Tabela 6 – Variáveis de Entrada do Processamento *Offshore* de Gás Natural Classificadas. 49
Tabela 7 – Médias e Desvios Padrões da Vazão de Gás Natural Bruto. 85
Tabela 8 – Médias Amostrais, Desvios Padrões Amostrais e Comportamentos das Distribuições das Variáveis de Consumo de Energia Elétrica. 95
Tabela 9 – Médias Amostrais, Desvios Padrões Amostrais e Comportamentos das Distribuições das Variáveis de Correntes de Produtos. 95
Tabela 10 – Impacto do Aumento da Área dos Módulos de Membranas nas Variáveis de Saída. 103

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
API	*Application Programming Interface*
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Derivados e Biocombustíveis
BPM	*Population Balance Modeling*
C1	Metano
C2	Etano
C3	Propano
CAE	*Computer-Aided Engineering*
CDF	*Cumulative Distribution Function*
CFD	*Computacional Fluid Dynamics*
CO_2	Dióxido de Carbono ou Gás Carbônico
DEA	Monoetanolamina
DEG	Dietilienoglicol
DLL	*Dynamic-Link Library*
DTD	*Document Type Definition*
E&P	Exploração e Produção
EIA	*U.S. Energy Information Administration*
EOR	*Enhanced Oil Recovery*
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GLI	*Glycol Package*
GN	*Gás Natural*
H_2O	Água
HCDP	*Hydrocarbons Dew Point*
HTML	*Hypertext Markup Language*
HYSYS	Simulador de Processos HYSYS da Aspentech Inc.
iC4	iso-Butano
iC5	iso-Pentano
iCDF	*Inverse of the Cumulative Distribution Function*
IDE	*Integrated Development Environment*
J-T	*Joule-Thomson*
MATLAB	Processador Visual-Numérico-Gráfico da Mathworks Inc.
MC	Monte Carlo
MDEA	Metildietanolamina
MEA	Dietanolamina
MEG	Monoetilenoglicol
MMC	Método de Monte Carlo
MME	Ministério de Minas e Energia
MP	*Membrane Permeation*
MMsm3/d	Milhão de metros cúbicos padrão por dia
MSW	*Municipal Solid Waste*
N_2	Nitrogênio
nC4	n-butano

nC5	n-Pentano
nC6	n-Hexano
nC7	n-Heptano
nC8	n-Octano
nC9	n-Nonano
NGL	*Natural Gas Liquids*
OLE	*Object Linking and Embedding*
PBM	*Population Balance Modeling*
PDF	*Probability Density Function*
PR	*Peng-Robinson*
SD	*Standard Deviation*
SGML	*Standard Generalized Markup Language*
SMS	Saúde, Meio ambiente e Segurança
TEA	Trietanolamina
TEG	Trietilenoglicol
VB	*Visual Basic*
VB .NET	*Visual Basic .NET*
VBA	*Visual Basic for Applications*
VBS	*Visual Basic Script*
W3C	*World Wide Web Consortium*
WPD	*Water Dew Point*
XML	*eXtensible Markup Language*

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o consumo de gás natural, considerado o mais limpo dos combustíveis fósseis, vem crescendo cada vez mais. Mundialmente este consumo é maior do que 3,3 trilhões de metros cúbicos por ano (BP, 2013). No Brasil, em que o consumo gira em torno de 29,2 milhões de metros cúbicos por ano (BP, 2013), são grandes os investimentos para processamento de gás natural associado a petróleo, particularmente nos campos *offshore* do polo Pré-Sal das Bacias de Santos e de Campos.

No entanto, muitas e severas são as incertezas que afetam o processamento *offshore* de gás natural: desde flutuações de condições de carga, de preço e de mercado consumidor do gás a flutuações de custos de equipamentos, de utilidades, de eventos meteorológicos em alto mar, e até aos grandes riscos operacionais de dispositivos submarinos e de processos embarcados. Estas enormes incertezas recomendam que o dimensionamento do processamento *offshore* de gás natural utilize técnicas de decisão sob influência de fatores probabilísticos. Uma técnica poderosa para decisão em cenário não-determinístico é conhecida como Método de Monte Carlo (MMC).

Com os avanços na área de Engenharia Auxiliada por Computação, a metodologia de Monte Carlo (MMC) se apresenta como excelente opção para estimar a probabilidade de determinado projeto de processamento de gás em plataforma **cumprir todas as especificações ou metas de processo** dentro de determinado cenário probabilístico de interesse. O MMC se baseia em obter amostragens das respostas do processo proposto frente a amostragens de cenários probabilísticos sorteados de acordo com a função densidade de probabilidade (PDF) dos fatores não-determinísticos que influenciam a resposta do processo e que são considerados na análise.

Neste trabalho é desenvolvida uma ferramenta computacional em VB-XML que age integrada ao simulador de processos HYSYS e ao software MATLAB para gerar análise MMC a partir de respostas de um projeto de processamento de gás natural em plataforma *offshore* quando submetido a uma amostragem de fatores probabilísticos com PDF conhecida que afetam o processo. A ferramenta computacional em questão, deste ponto em diante chamada de **APP-VB-XML-HYSYS-MATLAB**, controla a condução desta amostragem, que pode ter centenas ou milhares ou dezenas de milhares de casos rodados; administra as dezenas de Mbytes de dados criados; e gera diagnósticos

estatísticos e relatórios gráficos que permitem estimar a probabilidade de sucesso do projeto em cumprir as metas ou especificações atribuídas. Em função desta probabilidade, o tomador de decisões deve avaliar se aprova ou se modifica o investimento (i.e. o Projeto) e/ou o consumo de energia do processo (i.e. as condições operacionais) de forma a elevar ou reduzir a probabilidade de sucesso do mesmo.

1.1. Motivações

Esta dissertação vem em resposta às seguintes motivações:

- Investimentos na área de E&P para processamento de gás natural em campos *offshore* são de imensa ordem de grandeza e de grande complexidade, tanto em termos geográfico e temporal, como em termos material e humano. Além disto, tais investimentos são projetados sob severo quadro de incertezas decorrente de inúmeros fatores ou agentes cujos comportamentos não podem ser conhecidos de antemão. Em decorrência, raramente há certeza absoluta que o desempenho esperado será cumprido ou se haverá incidências não previstas que afetem parcial ou totalmente as respostas do empreendimento nas diversas esferas possíveis, a saber, Econômica, Ambiental e Social. Neste contexto, o presente trabalho poderá ter resultante positiva na esfera Econômica do empreendimento. APP-VB-XML-HYSYS-MATLAB pode ser direcionada a estimar o **mínimo investimento** necessário para cumprir metas na área de processamento de gás natural **com probabilidade de sucesso conhecida**.
- Provavelmente tão ou mais importante que a Motivação Econômica, e na Ordem do Dia do Século XXI, há a esfera Ambiental. APP-VB-XML-HYSYS-MATLAB obtém amostragens do quadro de consumo de eletricidade ou de potência mecânica do processo em análise. Ora, em uma plataforma *offshore*, consumo de eletricidade é sinônimo de emissão atmosférica de CO_2 gerado nos *turbo-shafts* termoelétricos acionados a gás natural. Portanto, APP-VB-XML-HYSYS-MATLAB poderá ser direcionada para estimar a **mínima carga de emissão de CO_2** necessária para cumprir metas na área de processamento de gás natural **com probabilidade de sucesso conhecida**.
- Em forte conexão com as Motivações Econômica e Ambiental acima, há os aspectos de Segurança Operacional e Prevenção de Perdas. Um processo que não cumpre especificações está, obviamente, gerando perdas e frequentando

terreno instável caracterizado por maior risco operacional, econômico e ambiental. APP-VB-XML-HYSYS-MATLAB obtém amostragens de todas as variáveis de processo sujeitas (ou não) a especificações, como, por exemplo, a composição de CO_2 do gás natural tratado. Ora, gás natural de exportação excedendo a composição de CO_2 limite estipulada por regulamentação ANP (3%), está fadado a ser desviado para outro destino que não a exportação como, por exemplo, EOR, o que poderá configurar perda. Portanto, APP-VB-XML-HYSYS-MATLAB pode estimar as probabilidades do projeto em questão **não cumprir parte ou todas as especificações de interesse**. Novamente, em função desta probabilidade, o tomador de decisões a cargo deve avaliar se aprova ou se modifica o investimento (i.e. o Projeto) e/ou o consumo de energia do processo (i.e. as condições operacionais) de forma a elevar ou reduzir a probabilidade de geração de perdas do mesmo.

- Os avanços na área de Engenharia Auxiliada por Computação (CAE) também serviram de motivação para este trabalho. Tais recentes recursos criam naturalmente a motivação de demonstrar seu potencial em aplicações na Engenharia de Processos Químicos, que é uma ciência fortemente interdisciplinar já caracterizada pela integração de diversas metodologias.
- Por fim, de maneira geral, análises de SMS em qualquer projeto são extremamente importantes, especialmente em instalações de condições operacionais severas ou de alto risco, ou situados em locações remotas, ou expostas a fatores ambientais severos, todas estas características de plataformas *offshore* operando em águas profundas. Neste sentido, APP-VB-XML-HYSYS-MATLAB poderá ser direcionada para estimar probabilidades de diversas ocorrências nas respostas do processo em questões que tenham viés SMS.

1.2. Objetivos

Essa Dissertação tem como foco central o desenvolvimento da ferramenta computacional APP-VB-XML-HYSYS-MATLAB para executar análise MMC no contexto de projeto de sistemas de processamento de gás natural em plataformas *offshore*. Este trabalho tem, portanto, os seguintes objetivos:

- Determinar a mínima capacidade (i.e. investimento) de sistemas de processamento de gás natural em plataformas *offshore* para cumprir especificações de produção com **determinada probabilidade de sucesso.**

- Determinar o mínimo consumo de energia elétrica por compressores e máquinas de processo, e desta forma a mínima carga de emissão de CO_2, de sistemas de processamento de gás natural em plataformas *offshore* para cumprir especificações de produção com **determinada probabilidade de sucesso.**
- Determinar probabilidades de não cumprimento de especificações de sistemas de processamento de gás natural em plataformas *offshore*.

Além dos objetivos diretamente relacionados ao processamento *offshore* de gás natural, APP-VB-XML-HYSYS-MATLAB foi desenvolvida com o objetivo de ser genérica, de modo a possibilitar a execução de análise MMC para qualquer processo químico em ambiente do simulador HYSYS.

1.3. Esboço desta Dissertação

O Capítulo 2 é o responsável pela Revisão Bibliográfica da Dissertação fornecendo o embasamento teórico para desenvolvimento do trabalho, revisando desde Engenharia de Processamento de Gás Natural, passando por Programação Orientada a Objetos, Simulação de Processos Automatizada, e CAE, até chegar ao Método de Monte Carlo que é conteúdo central da Dissertação. O Capítulo 3 apresenta a simulação do fluxograma base para processamento *offshore* de gás natural visando ao condicionamento do mesmo para exportação. O Capitulo 4 apresenta o desenvolvimento de ferramenta APP-VB-XML-HYSYS-MATLAB para geração de amostragens de simulações do fluxograma de processo para Análise MMC. O Capitulo 5 detalha os procedimentos da Análise MMC e métodos estatísticos envolvidos, assim como os resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 6 conclui a análise da Dissertação e apresenta as conclusões e sugestões.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Processamento de Gás Natural

2.1.1. Introdução

O gás natural, por definição, é a porção de petróleo que existe na fase gasosa ou em solução no óleo, nas condições de reservatório e que permanece no estado gasoso nas condições atmosféricas de pressão e temperatura (Vaz et al., 2008). É um gás formado por hidrocarbonetos leves, cujo componente principal é o metano. Este gás combustível é encontrado em rochas porosas no subsolo e pode ser classificado como gás não associado ou gás associado, de acordo com sua ocorrência na natureza. O gás classificado como não associado é produzido em poços com pouco petróleo, enquanto o classificado como associado é produzido em poços com predominância de óleo, onde este pode estar dissolvido no petróleo ou acumulado na forma de uma capa de gás, sendo sua produção associada à produção de Petróleo. A Figura 1 esquematiza reservatórios de produção de ambos os tipos de gás natural.

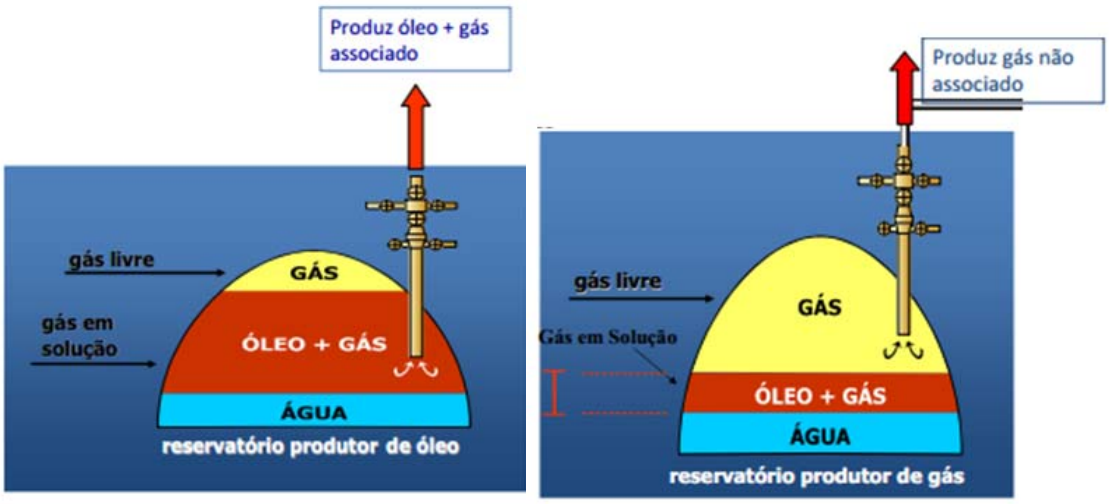


Figura 1. Esquema de reservatórios de gás associado e de gás não associado (Santos, 2012).

A exploração de reservatórios de gás não associado só se justifica se houver viabilidade comercial do gás (Sant'Anna, 2005). Já no caso de reservatórios de gás associado, em que a produção do gás está associada à produção de petróleo, o gás pode ser injetado no reservatório, queimado ou comercializado (Santos, 2012).

Há milhões de anos, restos de plantas e animais (material orgânico) apodreceram e foram depositados em grossas camadas. Ao passar do tempo, areia e lodo se transformaram em rocha revestida com material orgânico, que foi aprisionado dentro da rocha. Efeitos de

pressão e calor transformaram parte deste material orgânico em carvão, e outras partes em petróleo e gás natural, como ilustrado na Figura 2.

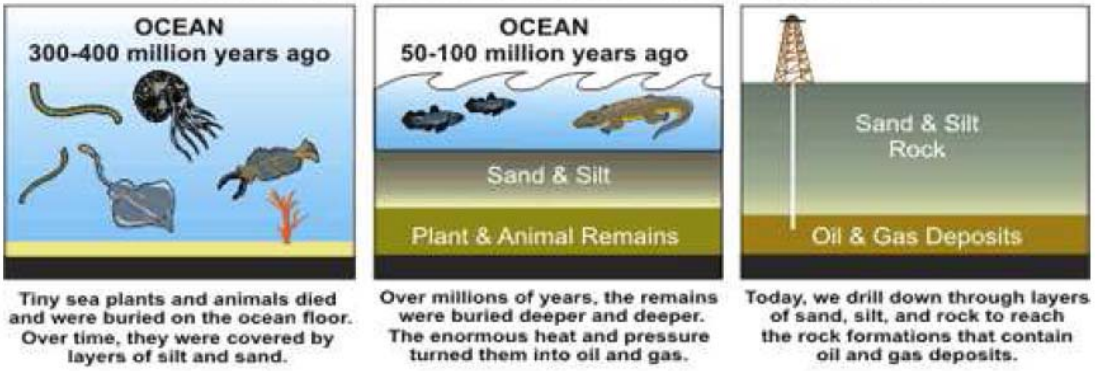


Figura 2. Formação de Petróleo e Gás Natural. Fonte: EIA.

A composição do gás natural pode variar por estar ou não associado ao óleo e até mesmo por ter sido ou não processado em unidades industriais. Sua composição básica inclui metano, etano, propano, hidrocarbonetos de maior peso molecular, também conhecidos como componentes pesados, em menor proporção e baixo teores de contaminantes como nitrogênio (N_2), dióxido de carbono (CO_2) e compostos de enxofre, como exemplifica a Tabela 1 (MELO e MEDINA, 2005). A fonte da composição de gás natural associado é referente ao campo de Garoupa (Bacia de Campos); de gás natural não associado, ao campo de Miranga (Bahia) e a de gás natural processado, à saída da UPGN Candeias (Bahia). No entanto, as correntes de gás natural dos campos do Polo Pré-Sal, possuem altas concentrações do contaminante CO_2.

Tabela 1 – Composições (% Molar) Típicas do Gás Natural.

Componente	GN Associado	GN Não Associado	GN Processado
C1	81,57	85,48	88,56
C2	9,17	8,26	9,17
C3	5,13	3,06	0,42
iC4	0,94	0,47	-
nC4	1,45	0,85	-
iC5	0,26	0,20	-
nC5	0,30	0,24	-
nC6	0,15	0,21	-
nC7 e superiores	0,12	0,06	-
N_2	0,52	0,53	1,2
CO_2	0,39	0,64	0,65

.

O gás natural é uma fonte de energia muito versátil, que pode ser utilizado como combustível para fornecimento de calor, geração de eletricidade e de força motriz; como matéria-prima nas indústrias siderúrgica, química, petroquímica e de fertilizantes. Na área de transportes é utilizado como substituto do óleo diesel, gasolina e álcool. Segundo MELO e MEDINA (2005), o uso do gás natural apresenta uma série de vantagens:

- Macroeconômicas:
    - Diversificação da matriz energética;
    - Fontes de importação regional;
    - Disponibilidade ampla, crescente e dispersa;
    - Redução do uso do transporte rodo-ferro-hidroviário;
    - Atração de capitais de riscos externos;
    - Melhoria do rendimento energético;
    - Maior competitividade das indústrias;
    - Geração de energia elétrica junto aos centros de consumo;
    - Não exige gasto de energia com o aquecimento para a queima;
    - Aumento da oferta de empregos;
    - Elimina o custo da estocagem;
- Diretas ao usuários:
    - Redução de doenças respiratórias;
    - Maior vida útil dos equipamentos;
    - Obtenção de curvas de temperatura ideais;
    - O calor energético queimado se aplica diretamente ao produto;
    - Dispensa aquecimento no inverno;
    - Fácil adaptação das instalações existentes;
    - Menor investimento em armazenamento/uso de espaço;
    - Menor corrosão dos equipamentos e menor custo de manutenção;
    - Menor custo de manuseio de combustível;
    - Menor custo das instalações;
    - Combustão facilmente regulável;
    - Elevado rendimento energético;
    - Admite grande variação do fluxo;
    - Pagamento após o consumo;
    - Menores prêmios de seguro;
    - Custo bastante competitivo em outras alternativas;

- Ambientais de Segurança:
    - Não apresenta restrições ambientais;
    - Reduz a emissão de particulados;
    - Redução do desmatamento;
    - Composição química constante, sem compostos pesados;
    - Dispensa a manipulação de produtos químicos perigosos;
    - Elimina o tratamento de efluentes dos produtos da queima;
    - Melhoria da qualidade do ar nas grandes cidades;
    - Baixíssima presença de contaminantes;
    - Não emissão de particulares (cinzas);
    - Não exige tratamento dos gases de combustão;
    - Rápida dispersão de vazamentos;
    - Emprego em veículos automotivos, diminuindo a poluição urbana.

A partir da Conferência Mundial das Nações Unidas (RIO-92) e, posteriormente, em 1997, com a elaboração do Protocolo de Quioto, o componente ambiental passou a ter papel estratégico na produção de energia primária no mundo. Neste contexto, o gás natural ganhou força em relação às fontes de energia concorrentes, como carvão e derivados do petróleo, devido às suas menores taxas de emissão de gases de efeito estufa (Vaz et al., 2008).

No Brasil, o consumo percentual de gás natural, com base no ano de 2012, está ilustrado na Figura 3.

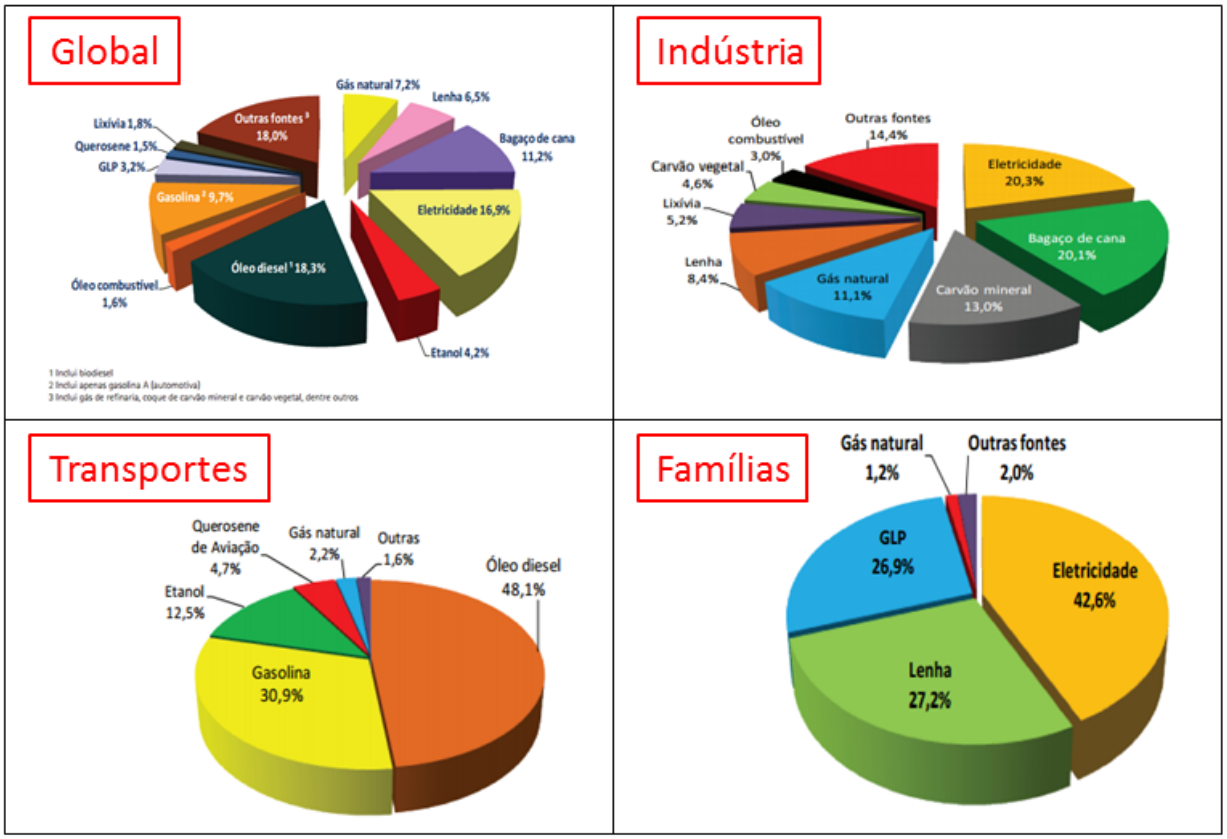


Figura 3. Consumo Final de Energia por Fonte no Brasil no Ano Base de 2012. Fonte: EPE/MME.

2.1.2. Desidratação do Gás Natural

Existem diversas razões para que os processamentos *offshore* de óleo e gás passem por etapas de desidratação. A água deve ser removida do petróleo devido ao seu potencial corrosivo, favorecimento de incrustações e à sua capacidade de formar emulsões com viscosidades superiores à do petróleo desidratado. A água também deve ser removida do gás natural por levar à formação de hidratos de hidrocarbonetos (por exemplo, hidratos de metano) em uma corrente de gás natural úmido sob alta pressão e temperaturas inferiores a 15ºC, condições estas comuns nos dutos *sub-sea* do processamento *offshore*. Tais hidratos precipitam como sólido similar ao gelo que, ao se depositar como neve e recongelar, pode reduzir o diâmetro dos dutos causando perdas de carga, redução de capacidade, paradas (*shut-downs*), ou violando limites de segurança operacional. Sua remoção evita pressões altas a montante e o superdimensionamento do sistema de compressão, bombeio e transferência, além de danos às operações de processo nas refinarias, pois representa um volume ocioso na transferência e tancagem do petróleo e pode gerar problemas de incrustação e corrosão nos oleodutos de exportação (SANT'ANNA *et al.*, 2005).

NETUSIL e DITL (2011) compararam 3 métodos para desidratação de gás natural:

- **Absorção com TEG** (trietileno glicol): Neste processo, o gás natural úmido é desidratado através do contato direto com TEG sequestrante de água em uma coluna absorvedoras com fluxos de gás e TEG líquido em contracorrente. O TEG rico em água segue para uma coluna de esgotamento onde é então regenerado transformando-se em TEG pobre e reciclado para a absorção. A Figura 4 ilustra esse processo.

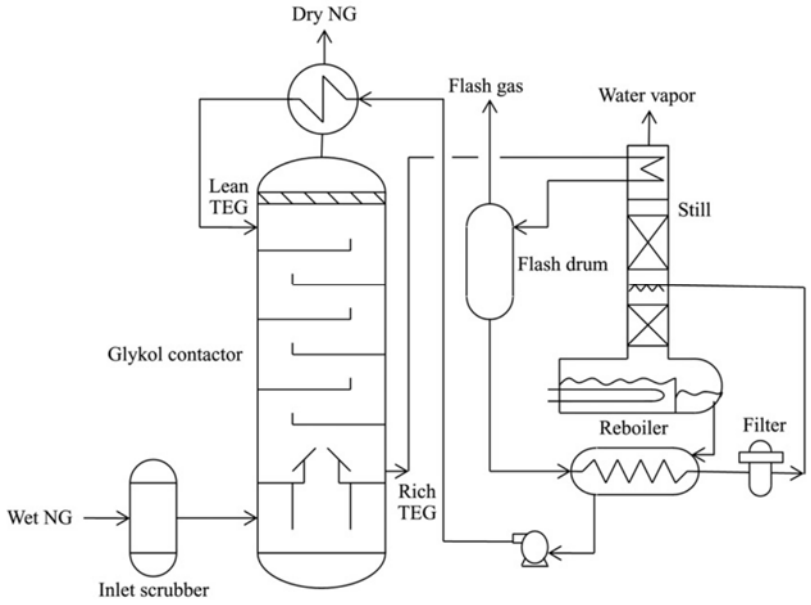


Figura 4. Esquema de Desidratação de Gás Natural por Absorção com TEG (NETUSIL E DITL, 2011).

- **Adsorção com sólido dessecante:** Neste processo a água é removida do gás natural através de adsorção em peneira molecular, sílica gel ou alumina em leitos fixos de desidratação regeneráveis como mostra a Figura 5. A capacidade de adsorção de água destes sistemas aumenta com o acréscimo de pressão e decréscimo de temperatura. As plantas de adsorção de água sobre sólidos operam com vários leitos em paralelo de modo que a continuidade operacional seja mantida, já que os leitos trabalham em regime intermitente; isto é, há sempre pelo menos um leito em serviço de adsorção e outro sendo regenerado (i.e. tendo a água capturada purgada) por contato em reversão com gás desidratado aquecido.

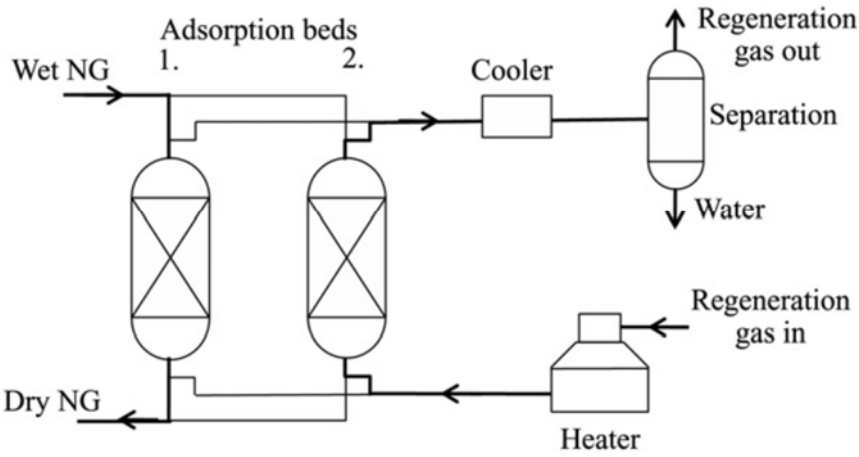


Figura 5. Esquema de Desidratação de Gás Natural por Adsorção com Sólido Dessecante (NETUSIL E DITL, 2011).

Condensação: Neste processo o gás é resfriado sob pressão para que haja condensação da água, que então é removida da corrente de gás natural. Componentes líquidos do gás natural (NGLs) e hidrocarbonetos mais pesados também podem ser removidos do gás natural por resfriamento para simultânea desidratação e recuperação de NGL. O gás natural também pode ser resfriado através do efeito Joule-Thomson (J-T), que descreve como a temperatura de um gás é alterada por queda de pressão sob entalpia constante em uma válvula. Uma explicação é a seguinte: A expansão do gás natural sob entalpia constante faz com que a distância média entre as moléculas aumente, levando a um aumento da energia potencial associada a forças de van der Waals. Durante a expansão, não há troca de calor ou de trabalho com o gás, assim, de acordo com o princípio de conservação da energia (1º Lei da Termodinâmica), o aumento da energia potencial levará a uma diminuição da energia cinética das moléculas, o que significa redução na temperatura do gás natural. Esta queda de temperatura poderá resultar em condensação parcial. Este processo está ilustrado na Figura 6 na qual o resfriamento acontece por expansão em dois estágios valvulados e por resfriamento externo, usando-se MEG para deprimir o ponto de congelamento da água evitando entupimento por gelo e/ou hidratos de hidrocarbonetos. NETUSIL e DITL (2011) concluíram que o processo de condensação através do efeito J-T é mais vantajoso para remoção de componentes líquidos e hidrocarbonetos mais pesados do gás natural.

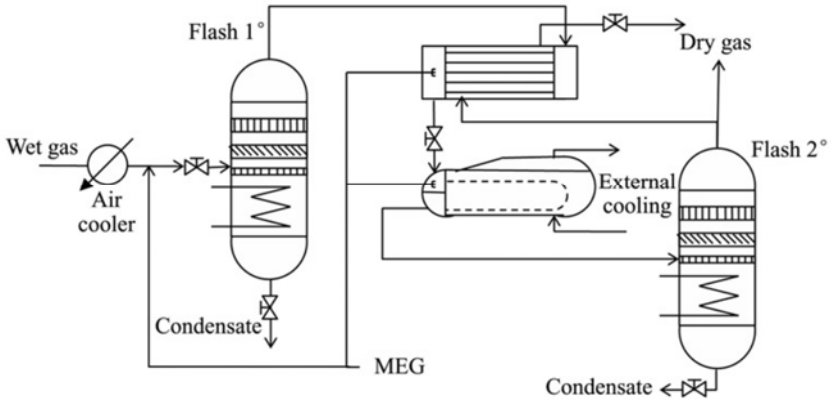


Figura 6. Esquema de Desidratação de Gás Natural por Resfriamento (NETUSIL E DITL, 2011).

Segundo BAHADORI e VUTHALURU (2009), o uso da desidratação de gás natural com TEG é economicamente mais favorável para atender a especificações de ponto de orvalho. SANT'ANNA et al. (2005) e MACHADO et al. (2012) também demonstraram processo de desidratação do gás natural através de desidratação com TEG.

Segundo CAMPBELL (1984), vários líquidos possuem a capacidade de absorver água do gás natural. No entanto, muito poucos se encaixam nos critérios para atingir viabilidade comercial, a saber: ser altamente higroscópico, não solidificar em solução concentrada, não ser corrosivo, não formar precipitados com os constituintes do gás, ser facilmente regenerado à alta concentração, ser essencialmente não solúvel em hidrocarbonetos líquidos, ser facilmente separado da água por esgotamento, o que exige grande diferença de ponto de ebulição, ser estável termicamente nas altas temperaturas de regeneração e ser relativamente estável na presença de componentes sulfúricos e dióxido de carbono (CO_2) sob condições normais de operação. Muitos glicóis chegam perto de atender todos os critérios acima. Dietilenoglicol (DEG), trietilenoglicol (TEG) e tetraetilenoglicol (TREG) são todos glicóis viáveis. No entanto, a grande maioria dos processos comerciais utiliza o TEG, devido ao seu preço acessível para compra.

2.1.3. Remoção de CO_2 do Gás Natural

Como é crescente a demanda do uso de gás natural como um combustível mais eficiente e limpo, a remoção de CO_2 é muito importante, por este ser um dos contaminantes mais comuns no pré sal e por não agregar nenhum poder calorífico, reduzindo o poder calorífico do gás, e por formar ácidos ou soluções ácidas na presença de água que são altamente corrosivos, podendo causar danos a tubulações e equipamentos

Yeo *et al* (2012) fizeram uma revisão comparando o uso de processos convencionais e o uso de membranas para remoção de CO_2 do gás natural. Os seguintes processos convencionais foram apresentados:

- **Absorção Química**: A absorção química do CO_2 é baseada na reação exotérmica de um absorvente com CO_2 presente na corrente de gás natural em baixa temperatura. A reação é então revertida em subsequente operação de regeneração em temperatura mais elevada e baixa pressão. Solventes químicos se unem fortemente ao CO_2, mesmo em baixas pressões parciais de CO_2, no entanto, a regeneração do solvente rico em CO_2 requer muita energia.
    - **Adoçamento com alcanolaminas**: Monoetanolaminas (MEA), dietanolaminas (DEA), trietanolaminas (TEA) e metildietanolamina (MDEA) são alguns exemplos da família de alcanolaminas que podem ser usadas em soluções aquosas (≈30%w/w) para captura de CO_2. MDEA é amplamente utilizada em gás natural sob alta pressão por ter maior capacidade de absorção de CO_2, maior estabilidade térmica na regeneração e menor entalpia de regeneração que as demais. A utilização em base aquosa é necessária e ajuda a manter o solvente seletivo apenas aos gases ácidos preservando os hidrocarbonetos na fase do gás natural. A capacidade de captura da absorção química em alcanolaminas é limitada à conversão das aminas (isto é, *loadings* de captura dificilmente ultrapassam 1mol CO_2 por mol de amina).
    - **Absorção *Hot-Carbonate***: Este é um processo de conversão química em que o CO_2 contaminante é removido da corrente de gás natural por reação com solução aquosa de carbonatos formando bicarbonatos. O solvente é seletivo a CO_2 e a H_2S, i.e. os demais compostos do gás não reagem não sendo absorvidos. O *loading* de captura também é limitado à conversão do reagente carbonato. O processo mais comum é a absorção de CO_2 por carbonato de potássio a quente conhecido como Processo *Benfield Hot Carbonate*.
- **Absorção Física**: A absorção física utiliza solventes que não reagem com CO_2, ocorrendo a captura por solubilização simples, a qual é favorecida pela pressão parcial do componente a ser removido e por baixas temperaturas. Há duas grandes vantagens na absorção física. A primeira é que a regeneração do solvente não necessita de cargas térmicas apreciáveis; usualmente apenas uma

despressurização adiabática é suficiente para esgotar o solvente. A segunda vantagem é que o *loading* de captura de CO_2 não é limitado como na absorção química; i.e. a captura por kg de solvente cresce ilimitadamente com a pressão parcial de CO_2 e com a queda de temperatura. O grande problema da absorção física é que o solvente não é muito seletivo aos gases ácidos, aceitando solubilização de hidrocarbonetos. Isto faz com que ocorra, invariavelmente, grandes capturas indesejáveis de hidrocarbonetos valiosos nos casos de alta pressão, significando perdas de gás tratado. Por este motivo, para aumentar a rejeição a hidrocarbonetos, os processos de absorção física tendem a usar solventes oxigenados como metanol, carbonato de propileno, poliglicóis, etc. Os processos deste tipo mais comuns são:

    - Rectisol;
    - Selexol.

- **Absorção Físico-Química**: Este processo combina aminas aquosas com solventes orgânicos físicos, que, como visto acima, normalmente aceitam *loading* de captura superior ao das soluções aquosas de aminas, embora sejam menos seletivos que estas. Isto reduz a taxa de circulação de solvente necessária para a separação, ao mesmo tempo em que alguma seletividade ao CO_2 ainda é mantida. O processo deste tipo mais comum é o Sulfinol.
- **Adsorção**: Adsorção é o enriquecimento de componentes originalmente gasosos ou originalmente diluídos em uma solução líquida sobre a superfície de um sólido. A superfície do sólido tem sítios ativos que podem se ligar a moléculas externas. Os processos desse tipo mais comuns são:
    - Peneira Molecular: Zeólitas e Alumino-fosfato;
    - Carvão Ativado.

A absorção química de CO_2, utilizando-se colunas de absorção e de regeneração, é ilustrada na Figura 7. Trata-se de uma tecnologia bem aceita e de ampla utilização na indústria de processamento de gás natural. No entanto, a torre de absorção é particularmente cara, de grande diâmetro devido à seção requerida ao escoamento do gás, de parede espessa devido à pressão, portanto um vaso pesado de construção complexa. Além disso, uma grande quantidade de fluido absorvente deve ser recirculada por kg de gás tratado já que os *loadings* de captura raramente passam de 1mol CO_2 capturado por mol de amina. Os custos de carga térmica na regeneração e de

manutenção também são altos, especialmente com corrosão e deposição de sólidos na coluna de regeneração onde costuma ocorrer degradação térmica de aminas.

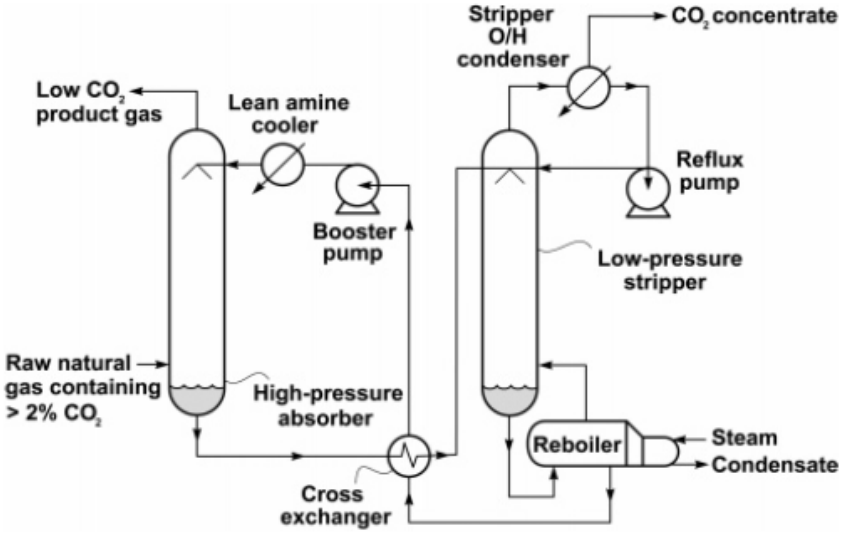


Figura 7. Processo Típico de Remoção de CO_2 do Gás Natural por Absorvedor/*Stripper* Utilizando Aminas (BAKER & LOKHANDWALA, 2008).

Processos de adsorção não são atrativos para remoção de CO_2 devido à baixa seletividade dos adsorventes ao CO_2. Além disso, processos convencionais de adsorção são custosos, com pouca eficiência, requerem pré-tratamento e produzem grande quantidade de água de descarte e lodo.

Por fim, há os processos não convencionais de remoção de CO_2 de gás natural. Nesta categoria destacam-se as tecnologias utilizando permeação em membranas (MP). Permeação em membranas (MP) representa uma solução preferível em certos casos quando comparada aos processos convencionais devido a várias vantagens comparativas, a saber: simplicidade operacional; alta confiabilidade; baixo capital; baixo custo operacional; processo ambientalmente limpo; *footprint* e peso reduzidos; modularidade, que traz eficiência no uso do espaço; consumo de energia elétrica reduzido; pouca manutenção requerida; processo contínuo e sem necessidade de etapa de regeneração. A Figura 8 mostra a estrutura física de membranas utilizadas para condicionamento de gás natural em baterias MP.

O grande entrave que impede maior expansão na utilização de unidades MP resulta das seguintes desvantagens comparativas com as demais tecnologias de captura de CO_2, a saber: (i) O binômio Seletividade e Capacidade de Processamento não pode ser atendido simultaneamente; i.e. ou as unidades MP são seletivas ao CO_2 e operam à baixa

capacidade de permeação; ou operam a alta capacidade de permeação com baixa seletividade ao CO_2 o que significa perdas de CH_4 no permeado; (ii) Há grande consumo indireto de energia mecânica para recompressão dos permeados ricos em CO_2 que são gerados em baixa pressão e cuja utilização posterior (como EOR) requer pressão alta; (iii) O material plástico usado nas baterias MP sofre desgaste contínuo por exposição aos hidrocarbonetos condensáveis, à alta pressão e à solubilização de CO_2 que causa efeitos degradativos conhecidos como *Swelling e Plasticization*, significando que a vida útil de um cartucho de MP é limitada a alguns meses operacionais, sendo comum os estouros de cartuchos que causam contratempos e *shut-downs* inesperados.

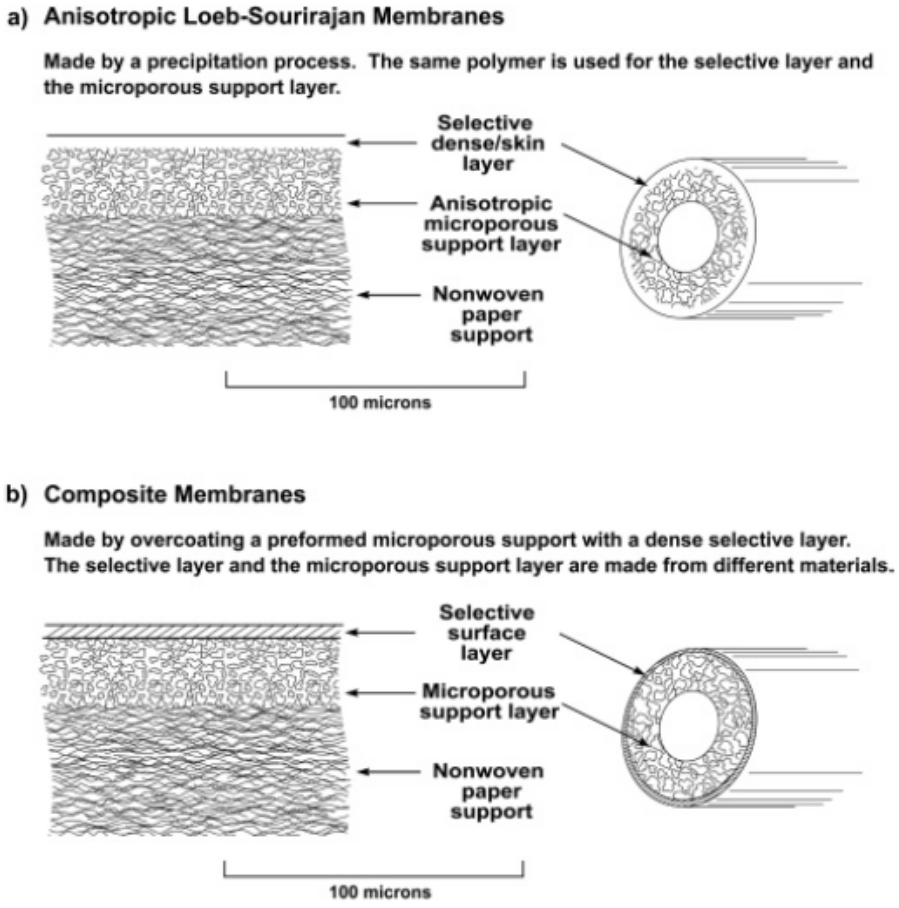


Figura 8. Estrutura de Membranas para Separações Gasosa (BAKER & LOKHANDWALA, 2008).

A separação de CO_2 de uma corrente gasosa por MP se dá pela seletividade da membrana ao CO_2 em relação aos demais componentes do gás, que ficam retidos no lado de alta pressão da unidade também conhecido como retentado ou resíduo. A Figura 9 esquematiza três configurações de separação de CO_2 por módulos MP.

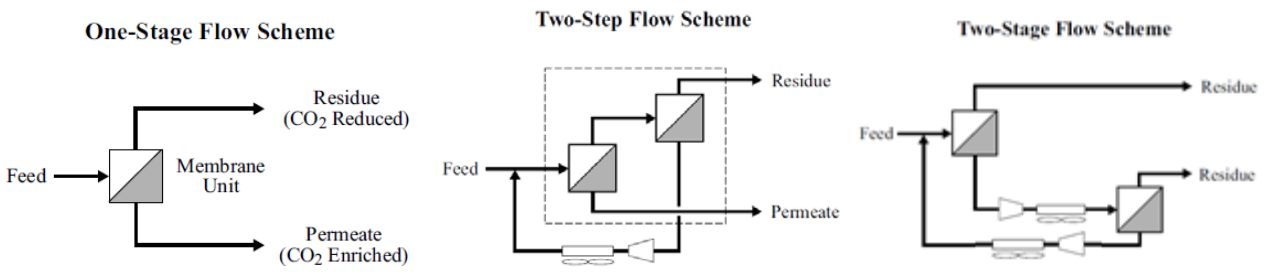


Figura 9. Configurações de CO2 por Módulos de Membranas. Fonte: UOP

A Lei de Fick modificada, descrita pela Eq. (1) é amplamente utilizada para aproximar processos de difusão em MP.

$$J = \frac{k.D.\Delta p}{l} \quad \textbf{(1)}$$

Onde,

$J =$ Fluxo do componente a ser separado trans-membrana, ou seja, vazão molar de CO_2 que atravessa a membrana por unidade de área;

$k =$ Coeficiente de solubilidade do componente a ser separado na camada seletiva da membrana;

$D =$ Coeficiente de difusão do componente a ser separado através da camada seletiva da membrana;

$\Delta p =$ Diferença de pressão parcial do componente a ser separado entre o retentado (alta pressão) e o permeado (baixa pressão);

$l =$ Espessura da camada seletiva (*skin*) da membrana.

2.2. Engenharia Auxiliada por Computação e Simulação de Processos

Nos dias de hoje, a Engenharia Química é considerada uma consagrada área de pesquisa que veio se desenvolvendo e amadurecendo durante o último século, sendo que esta sempre apresentou forte interdisciplinaridade. Em particular, ela apresenta uma forte ênfase em conciliar a Engenharia construtiva com a abordagem das ciências naturais analíticas. Os antigos objetivos da Engenharia Química eram o desenvolvimento de novos produtos e seus processos de produção e depois a procura por um profundo entendimento da natureza e descoberta de novos fenômenos. Nos últimos cinquenta anos, suas raízes tradicionais – Física, Química, Termodinâmica e Fenômenos de Transporte – têm sido complementada pelas ciências de sistemas – notavelmente a

Matemática e Ciência da Computação – e, mais recentemente, pela Microbiologia e Bioquímica. (SCHNEIDER & MARQUARDT, 2002).

A tecnologia de informação tem se tornado cada vez mais importante em todas as áreas da Engenharia nos últimos anos. Muito do progresso alcançado na Engenharia Química não seria possível sem os métodos e ferramentas proporcionados pela tecnologia da informação (RAFFO & KELLNER, 2000). Tal prática de se ter a tecnologia da informação associada aos processos da Engenharia é comumente denominada como Engenharia auxiliada por Computação, cuja sigla em inglês, CAE (*Computer-Aided Engineering*), tem sido amplamente utilizada.

Diversas áreas da Engenharia como um todo utilizam ferramentas computacionais e a Tabela 2 mostra alguns exemplos.

Tabela 2 – Aplicações Computacionais em Áreas da Engenharia.

Ferramenta	**Área de Aplicação**
HYSYS	Simulação de Processos
PRO-II	
EMSO	
CFX	CFD
FLUENT	
MATLAB / SIMULINK	Modelagem, Análise e Controle
PDMS	Modelagem 3D
PDS	
SM3D / SP3D	
COMOS	Modelagem 2D
SPPID	
SPI	
SPEL	

No que diz respeito à área de simulação de processos de Engenharia, atualmente progresso significativo vem sendo realizado no desenvolvimento de *softwares* com este objetivo. A modelagem em tais *softwares* tem sido cada vez mais utilizada para propósitos variados, tais como gestão estratégica, planejamento, controle e gestão operacional, melhoria de processos e adoção de tecnologia, compreensão e treinamento, com o objetivo final de tomada de decisão, redução de riscos e gestão estratégica, em níveis tático e operacional (DOMINGOS, 2010).

Uma das principais motivações para o uso de modelos de simulação, que são modelos computadorizados que representam o sistema dinâmico e fenômenos do processo em estudo, é o conhecimento de importantes pontos críticos quando os custos, riscos e logística de se manipular o real sistema do processo inviabilizam essa análise (KELLNER *et al*., 1999).

O desafio atual da CAE e da simulação de processos em geral, consiste em como definir arquiteturas e formas de associação de ferramentas, de tecnologias disponíveis e dos recursos humanos para potencializar os objetivos descritos acima, gerando produtos finais de maneira mais eficiente, com melhor qualidade e em menos tempo. Para tal, é fundamental o entendimento das ferramentas e recursos computacionais a serem utilizados e, portanto, do escopo do processo a ser simulado/modelado e de suas principais variáveis de entrada e saída.

2.2.1. O *Software* HYSYS e sua API

O software HYSYS é um versátil simulador de processos químicos originalmente desenvolvido pela Hyprotech e atualmente de propriedade da Aspentech, exibindo quatro características chave (Aspen HYSYS User's Guide, 2009):

- Operações orientadas a eventos (*event driven operations*);
- Operações modulares;
- Arquitetura de multi-fluxogramas;
- Design orientado a objeto.

O conceito de operações orientadas a evento combina a interatividade da simulação com o acesso instantâneo à informação, o que significa que a informação é processada à medida que é fornecida e os cálculos são realizados automaticamente. Como as operações modulares são combinadas com algoritmos não sequenciais, a informação é processada ao ser fornecida e os resultados de todos os cálculos são automaticamente propagados ao longo de todo o fluxograma. A arquitetura de multi-fluxogramas possibilita a criação de inúmeros fluxogramas em uma mesma simulação e possibilita a associação de um pacote termodinâmico para um definido grupo de operações, enquanto que o design orientado a objeto possibilita que a mesma informação apareça simultaneamente em diferentes localidades e seja atualizada automaticamente em todas elas em caso de

mudança. Esta última característica, além de garantir consistência aos dados da simulação, faz com que o HYSYS seja uma ferramenta de flexível customização, ideal para o desenvolvimento de novas funcionalidades e automatismos para potencializar ainda mais o seu uso.

Em consonância com o conceito acima, o HYSYS possui um guia de customização (Aspen HYSYS User's Guide, 2011) que pontua que a ferramenta possui uma avançada arquitetura de software e tecnologia OLE. Tecnologia OLE foi desenvolvida pela Microsoft de modo a permitir a incorporação e vinculação de documentos e outros objetos. Desta forma HYSYS pode prover um f*ramework* (conjunto reutilizável de bibliotecas ou classes para um sistema de software) baseado em componentes que seja de fácil customização, atualização e manutenção para atender aos requisitos do usuário. O guia também descreve duas abordagens para o conceito de customização:

- ***Automation***: Uso de ferramentas externas, como o *Visual Basic* ou o próprio editor (HYSYS *Macro Language Editor*) para programaticamente rodar aplicações HYSYS. Neste caso, as ferramentas externas, como Microsoft *Visual Basic* e componente VBA do Excel, Word, PowerPoint e Visio ou programas desenvolvidos em C++, conectam-se ao HYSYS em uma relação cliente/servidor. Com o uso dessa funcionalidade, é possível esconder a complexidade de uma simulação ao construir um *front-end* (abstração, coletando os dados de entrada e os simplificando em interface amigável) em outro programa de modo a possibilitar acesso somente aos parâmetros importantes da simulação.
- ***Extensibility***: Criação externa pelo usuário de unidades de operação customizadas (*User Operation*), pacotes termodinâmicos e modelos de reações químicas controladas por cinéticas que se tornem parte da simulação e funcionem como construídas dentro dos objetos do HYSYS. Este caso incorpora algoritmos customizados na forma de extensões de pacotes termodinâmicos, operações unitárias e reações cinéticas. Os cálculos são realizados na sequencia de cálculos da simulação do HYSYS. Extensões podem ser facilmente distribuídas para outras máquinas e elas possuem a aparência de qualquer outro objeto do HYSYS. Extensões são facilmente desenvolvidas, testadas e comercializadas como *add-ins* (componentes

adicionados a um computador ou componente para aumentar suas capacidades).

2.2.2. Linguagem *Visual Basic* (VB)

A linguagem VB, lançada pela Microsoft em 1991, é projetada para ser de fácil aprendizado para iniciantes e poderosa para especialistas, tendo como benefícios segurança e interoperabilidade. Essa linguagem possui três versões, a serem utilizados de acordo com o objetivo do desenvolvimento:

- ***Visual Basic .NET*** **(VB .NET):** Linguagem de programação orientada a objetos implementada no .NET *Framework*, que é um *framework* de *software* também desenvolvido pela Microsoft que roda principalmente em Microsoft Windows e inclui uma grande biblioteca, fornecendo inter-operabilidade de linguagem. Esta é uma evolução da clássica linguagem *Visual Basic* e, em 2005, a Microsoft decidiu abandonar a denominação .NET ao final, sendo amplamente utilizada para desenvolvimento de aplicativos através de arquivos executáveis ou DLLs (programação encapsulada para proteção de seu conteúdo, que necessita de executável para rodar), sendo executados em seu próprio espaço de memória. Nessa dissertação, será mantida a denominação .NET a título de diferenciação em relação às demais versões do VB. Para desenvolvimento de aplicativos com linguagens implementadas no .NET *Framework*, a Microsoft disponibiliza a ferramenta *Visual Studio*, uma IDE que possui um editor de código, compilador, com modelos de projetos de exemplos, *designers* e assistentes de códigos.
- ***Visual Basic for Applications*** **(VBA):** Essa linguagem é comumente associada à criação de macros no Microsoft Excel, no entanto, esta é apenas uma de suas aplicações. O VBA tem as mesmas habilidades do VB .NET, exceto por seus programas não apresentarem a funcionalidade de compilação em arquivos executáveis ou DLLs e execução em seu próprio espaço de memória, sendo parte da aplicação através da qual é executado. O VBA apresenta vantagem de acessar e manipular aplicações de forma mais rápida que o VB .NET por ser parte dela;
- ***Visual Basic Script*** **(VBS):** Essa linguagem utiliza a sintaxe *Visual Basic* e é a versão mais lenta e com menos funcionalidades e também é parte da aplicação na qual é executada. No entanto, tem como vantagem a manipulação direta da

aplicação sem a necessidade de compilação de um programa, sendo bastante útil para desenvolvimentos simples.

Realizando um paralelismo da interação da linguagem VB com o software de simulação de processos HYSYS, o VB .NET pode ser utilizado para o desenvolvimento de um aplicativo externo para leitura/escrita de dados em simulação e até mesmo para modelagem de fluxogramas. O VBS pode ser utilizado com o mesmo objetivo através do HYSYS *Macro Language Editor* e o VBA, através do Excel.

Quando se fala em programação orientada a objetos, o entendimento dos conceitos abaixo é de suma importância (Microsoft, Programação orientada a objetos no Visual Basic, 2008):

- **Classes e Objetos**: Como ambos os termos são muito utilizados em programação orientada a objetos, seus conceitos são facilmente confundidos. A classe é uma representação abstrata de algo, enquanto o objeto é um exemplo manipulável daquilo que a classe representa. Um objeto é uma estrutura que contém dados e métodos para manipular os dados. Isto é, são combinações de código e dados que podem ser tratados como unidades únicas. Classes permitem o agrupamento de itens relacionados como uma unidade, assim como o controle da visibilidade e acessibilidade para outros procedimentos; podendo herdar e reutilizar códigos definidos em outras classes. Uma classe não é utilizada diretamente, ela é utilizada somente para criar objetos baseados nela, e são os objetos que serão realmente utilizados.
- **Campos, Propriedades, Métodos e Eventos:** As classes consistem desses quatro elementos. Campos e propriedades representam informações que um objeto contém. Campos são como variáveis, pois podem ser lidos ou alterados diretamente. Já as propriedades fornecem maior controle como valores são lidos ou alterados. Métodos representam ações que um objeto pode realizar. Eventos são notificações que um objeto recebe de (ou transmite para) outros objetos ou aplicativos, permitindo com que o objeto realize ações sempre que uma ocorrência específica ocorrer.
- **Encapsulamento, Herança e polimorfismo:** Estas três qualidades são os alicerces da programação orientada a objetos. Encapsulamento significa que um grupo de propriedades, métodos e outros membros relacionados são tratados

como unidade ou objeto novo. Objetos podem controlar como as propriedades são alteradas e os métodos executados, como por exemplo, através de validação de valores antes de permitir a alteração de propriedades. O encapsulamento também permite ocultar detalhes da implementação dos objetos, prática conhecida como ocultamento de dados. Enquanto que herança descreve a habilidade de criação de novas classes baseadas em uma classe pré-existente, em que a nova classe herda todas as propriedades, métodos e eventos da classe base e pode ser customizada com propriedades e métodos adicionais. Já polimorfismo significa a possibilidade de se ter múltiplas classes que podem ser usadas intercambiavelmente mesmo que cada classe implemente as mesmas propriedades e métodos de modos diferentes. Em outras palavras, o polimorfismo representa a capacidade de objetos diferentes possuírem métodos de mesmo nome e mesma lista de parâmetros que quando chamados executam tarefas de maneiras diferentes.

2.2.3. Linguagem XML

A linguagem eXtensible Markup Language é um formato de texto simples e extremamente flexível, derivada do SGML (desenvolvido em 1980 e também denominado ISO 8879) e do HTML (desenvolvido em 1990). Ela foi idealizada pelo W3C em 1996 com o objetivo de enfrentar os desafios da publicação eletrônica em grande escala e acabou desempenhando um papel fundamental na troca de uma ampla variedade de dados na Web e em aplicativos. Segundo o W3C (2008), os objetivos do desenvolvimento da linguagem XML são os seguintes:

- Deve ser diretamente utilizável pela internet;
- Deve suportar uma ampla variedade de aplicações;
- Deve ser compatível com SGML;
- Deve ser fácil escrever programas que processam documentos XML;
- O número de características opcionais em XML deve ser mantido ao mínimo absoluto, idealmente zero;
- Documentos XML devem ser humano-legíveis e razoavelmente claros;
- Um projeto XML deve ser preparado rapidamente;
- Um projeto de XML deve ser formal e conciso;
- Documentos XML devem ser fáceis de criar;
- Concisão na marcação em XML é de importância mínima.

Um documento XML é escrito em estrutura de nós, através de tags que são abertas e fechadas. Os nós correspondem a elementos. Tais elementos possuem correspondência com outros elementos, podendo ter uma relação de pai ou filho. Um elemento pode ter como conteúdo outro elemento, um conteúdo simples de texto ou conteúdo misturado de outros elementos e texto ou ainda conteúdo vazio sem nenhuma informação. Os elementos também podem conter atributos, para armazenar informação adicional sobre o elemento.

A quantidade de tags de um arquivo XML é ilimitada e a definição de tags é feita de acordo com os dados a serem transferidos ou armazenados, sendo o XML uma linguagem auto-definível. A estrutura de um documento XML é definida por uma DTD, que lista todos os elementos possíveis do documento. Devido à estrutura de nós, também conhecida com estrutura em árvore, os documentos XML geralmente podem ser lidos como uma tabela em um banco de dados, o que justifica seu uso para armazenamento de dados.

2.3. Metodologia de Monte Carlo

O Método de Monte Carlo (MMC) é a mais importante das metodologias baseadas em análises probabilísticas utilizadas para análise de sistemas reais em cenários não-determinísticos, principalmente quando soluções analíticas apresentam alta complexidade ou são impossíveis de serem obtidas devido aos componentes não-determinísticos que não podem ser conhecidos de antemão (DZOBO *et al*., 2012). MMC também é de extrema importância quando é necessário avaliar dados reais, sem premissas de modelos ou aproximações por valores médios (TAUT *et al.*, 2000 e DZOBO *et al.*, 2012).

MMC pode ser usado para resolver qualquer problema matemático ou modelo complexo, demorado, ou cuja resolução analítica demande recurso intensivo. No contexto MMC, em vez de se resolver o problema numérico-matemático diretamente, obtém-se uma aproximação da solução através de amostragem estatística gerada a partir de realizações das variáveis independentes obedecendo determinadas funções densidade de probabilidade (PDF). Pelo Teorema do Limite Central, no limite de uma amostragem infinita, MMC deve ser capaz de reproduzir a realidade probabilística do sistema em questão. Para que este procedimento seja válido, a amostragem deve ser completamente

aleatória e o número de amostras deve ser suficientemente grande para representar com precisão a distribuição das variáveis de entrada do sistema a ser resolvido (RATICK & SCHWARZ, 2009).

Os recentes avanços na área da Engenharia da Computação foram fundamentais para a ampla aplicabilidade do MMC. Na década de 1970, HASTINGS escreveu que tais métodos seriam frequentemente mais eficazes do que métodos numéricos convencionais, objetando, contudo, que a implementação MMC generalizada acabaria por exigir uma amostragem de PDFs multi-dimensionais, o que resultaria em algo muito difícil e custoso em termos de análise e tempo computacional. Hoje em dia, MMC é utilizado em diversas áreas de conhecimento, dado o volume de publicações científicas encontradas a respeito deste uso.

Na área da Engenharia, ZHAO e ZHENG (2013) e WEI (2014) utilizaram MMC para estudo de modelagem de balanço de população (BPM) envolvendo processos com particulados. ECKSTEIN *et al.* (2000) usaram MMC para estudo de misturas turbulentas e LAGACHE *et al.*(2004), para previsão de propriedades termodinâmicas de gás natural e de condensados a alta pressão. Já TAUT *et al.* (2000) combinaram a PDF amostral de variáveis dependentes geradas em MMC com um código CFD, criando uma metodologia híbrida para análise da combustão de um motor nas três dimensões espaciais. Na Matemática, uma aproximação MMC foi usada por ANDRONOV (2005) para representar a distribuição de probabilidade de funções booleanas.

Tendo em vista a área de análise de riscos, baseada na modelagem de incertezas para tomada de decisões, com foco em SMS, ARUNRAJ *et al.* (2013) utilizaram simulação MMC para modelagem de incertezas, tendo como foco uma unidade de extração de benzeno de uma planta química. HABIB *et al.* (2014) utilizaram MMC para avaliação da formação natural de materiais radioativos em campos de produção de petróleo na Líbia. OLARU *et al.* (2014) utilizaram MMC para estudo do impacto de riscos ambientais na viabilidade de um projeto de uma empresa de energia na Romênia e LONATI e ZANONI (2013), para avaliação do risco à saúde humana devido a emissões de mercúrio em uma planta de gaseificação de lixo sólido municipal (MSW).

Por fim, na área específica de saúde, MMC encontra utilização em estudos referentes ao câncer, por esta ser uma doença marcada pela incidência de incerteza em suas causas e muitas vezes, em seus tratamentos. Neste contexto, YEH *et al.* (2014) usaram MMC para

modular a dose de terapia de radiação em pacientes com câncer de nasofaringe e GUIMARÃES *et al.* (2014) para o tratamento de câncer de fígado utilizando microesferas carregadas com radioisótopos beta-emissores.

Na prática, o objetivo MMC é analisar o desempenho de uma variável dependente de interesse (variável resposta) em função do comportamento de variáveis independentes que a influenciem e que encerram elementos de incerteza. MMC cria amostragens das variáveis independentes através da geração de números pseudo-aleatórios (números pseudo-uniformemente distribuídos entre 0 e 1) que são, em seguida, convertidos em sorteios obedecendo às PDFs das variáveis independentes, já que o comportamento de tais variáveis independentes é aleatório e segue específicas distribuições de probabilidade. Segundo JACQUES (1998), se uma grande quantidade de valores aleatórios das variáveis independentes for utilizada para cálculo de uma grande quantidade de valores das variáveis resposta e estes valores das variáveis resposta forem plotados como histogramas, os formatos das PDFs de saída poderão ser reconstituídos e utilizados para tomar decisões e eventualmente fazer intervenções na relação causal que atua entre as variáveis independentes (entradas) e as respostas (saídas).

Embora o conceito MMC seja simples, sua operacionalização requer a utilização de métodos matemáticos podendo ser bastante extensa. O Método da Transformação Inversa, descrito por JACQUES (1998), foi utilizado por ECKSTEIN *et al.* (2000) e ARUNRAJ *et al.* (2013) e será também utilizado nesta Dissertação.

2.3.1. Método da Transformação Inversa

O Método da Transformação Inversa faz uso das propriedades dos números aleatórios e da Função Distribuição Acumulada (CDF) de uma variável aleatória para geração amostral da sua PFD. Neste processo, acaba-se por inverter numericamente a CDF chegando-se à sua função inversa, a iCDF. As duas funções, PDF e CDF, por definição, estão relacionadas através da Eq. (2).

$$CDF(x) = \int_{-\infty}^{x} PDF(x)dx \qquad \textbf{(2)}$$

JACQUES (1998) descreve que a PFD de um número aleatório rnd é uniformemente distribuída entre 0 e 1, com valor de ordenada constante e igual a 1. Seja $rnd1$ uma

amostragem de rnd entre 0 e 1. Considere a CDF de uma outra variável aleatória x (CDF(x)). Esta é definida como a integral da respectiva PDF(x), como visto na Eq. (2), integral esta que assume valores crescentes de 0 a 1 à medida que x aumenta. Considere que se tenha interesse em obter, por amostragens, uma discretização da PDF da variável x (PDF(x)). Esta PDF tem domínio a <= x <= b como visto na Figura 10 (sudeste) e descreve a variação da densidade de probabilidade da variável x ao longo do intervalo a <= x <= b. Considere um valor específico x no intervalo a <= x <= $x1$. A CDF (CDF ($x1$)) é definida como a integral da PDF(x) ao longo da faixa a <= x <= $x1$ e aumenta de 0 a 1 conforme $x1$ aumenta de a a b. A chave para o MMC é reconhecer que se $rnd1$ = CDF($x1$), então um ponto de conexão unívoco é estabelecido entre $rnd1$ e $x1$ como mostrado na Figura 10. Seleções randômicas de rnd serão mapeadas em seleções aleatórias de x distribuídas obedecendo a original PDF(x). A Figura 10 ilustra a conexão unívoca entre $rnd1$ e PDF($x1$) via a equação $rnd1$ = CDF($x1$).

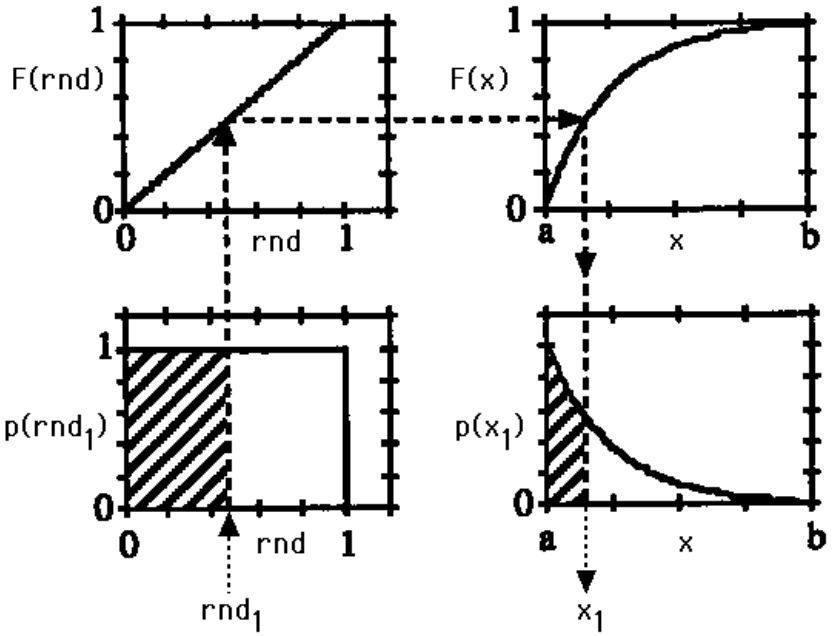


Figura 10. **Conexão entre $rnd1$ e PDF($x1$) via a equação $rnd1$ = CDF($x1$).**

Pela Figura 10, e ainda segundo JACQUES (1998), um número aleatório $rnd1$ é amostrado randomicamente entre 0 e 1. Este valor $rnd1$ aponta para um valor $x1$ no domínio da PDF(x) tal que $rnd1$=CDF($x1$). O processo equivale a igualar a área hachurada a esquerda de $rnd1$ (i.e. sobre $[0, rnd1]$) à área hachurada abaixo dePDF(x) sobre o intervalo $[a, x1]$. Desta maneira, a amostragem do número aleatório

$rnd1$ determina a amostragem de um único valor $x1$, valor este amostrado com probabilidade ajustada pela PDF(x). À medida que uma grande quantidade de números aleatórios $rnd1$ são amostrados, um conjunto análogo de valores $x1$ serão amostrados do domínio da PDF(x) de maneira não tendenciosa, de modo que um histograma composto pelos valores amostrados $x1$ reconstituirá a PDF original PDF(x).

A Eq. (3) esquematiza a equivalência de $rnd1$ = CDF($x1$) descrita acima.

$$\int_a^{x1} PDF(x)dx = CDF(x1) = CDF(rnd1) = \int_0^{rnd1} p(rnd)d(rnd) = rnd1 \quad \textbf{(3)}$$

Simplificando-se, tem-se a Eq. (4):

$$\int_a^{x1} PDF(x)dx = rnd1 \quad \textbf{(4)}$$

Aplicando-se inversão na Eq. (4) tem-se a Eq. (5) , construída em termos da iCDF, a função inversa da CDF, que pode ser usada para expressar o mapeamento de um conjunto de valores de determinada variável de interesse a partir de um conjunto de valores aleatórios uniformemente distribuídos entre 0 a 1.

$$x1 = iCDF\ (rnd1) \quad \textbf{(5)}$$

2.3.2. Geração de Populações Normais Pseudo-Randômicas

Para comprovar que a operacionalização do Método da Transformação Inversa por amostragens computacionais é viável, é fundamental descrever a Eq. (5) em uma lógica que possa ser processada através de linguagem computacional. Dessa maneira, este tópico tem o objetivo de exemplificar a geração de populações normais pseudo-randômicas através de equações facilmente processadas.

A Distribuição Normal, também conhecida como Distribuição Gaussiana, foi selecionada por descrever uma série de fenômenos físicos, meteorológicos, biológicos e financeiros, sendo uma das mais importantes distribuições de probabilidade da estatística. A PDF da

Distribuição Normal, inteiramente descrita por seus parâmetros de média (μ) e desvio padrão (σ), é dada na Eq. (6).

$$PDF(x,\mu,\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}, \quad -\infty < x < \infty, \quad \sigma > 0 \qquad \textbf{(6)}$$

Quando uma variável aleatória x segue a Distribuição Normal, esta relação é escrita em forma reduzida pela Eq. (7).

$$x \sim N(\mu, \sigma^2) \qquad \textbf{(7)}$$

Para os casos em que a média μ = 0 e o desvio padrão σ = 1, a distribuição é conhecida como Distribuição Normal Padronizada com PDF dada na Eq. (8).

$$PDF(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{z^2}{2}\right)} \qquad \textbf{(8)}$$

ABRAMOWITZ e STEGUN (1965) apresentam aproximador numérico para a inversa da CDF (iCDF) da Distribuição Normal Padronizada. Esta fórmula, na prática, corresponde a uma relação de conversão de uma população de números randomicamente amostrados entre 0 e 1 em uma população obedecendo à Distribuição Normal Padronizada, conforme mostrado nas Eqs. (9) a (13). As Eqs. (9) a (13) constituem um aproximador numérico da iCDF normal padronizada com erro absoluto menor que 4,5 x 10^{-4}. As Eqs. (9) a (13) lançam mão da simetria da PDF normal, de modo que elas estão escritas para valor p sendo um número aleatório sorteado no intervalo 0 < p <= 0,5. Para valores p sorteados entre 0,5 < p <= 1, as Eqs. (9) a (13) devem ser usadas com 1 – p, sendo trocado o sinal da abscissa padronizada z correspondentemente calculada. A população resultante de valores z gerada a partir da população de valores p seguirá aproximadamente a PDF normal padronizada.

$$t = \sqrt{ln\frac{1}{p^2}} \qquad \textbf{(9)}$$

$$z_p = t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \qquad \textbf{(10)}$$

$$c_0 = 2{,}515517 \quad d_1 = 1{,}432788 \tag{11}$$

$$c_1 = 0{,}8202853 \quad d_2 = 0{,}189269 \tag{12}$$

$$c_2 = 0{,}010328 \quad d_3 = 0{,}001308 \tag{13}$$

A Eq. (14) é utilizada para converter a população de valores z normal padronizados em uma população x normal com esperanca μ e desvio padrão σ quaisquer.

$$z = (x - \mu)/\sigma \rightarrow x = \mu + z * \sigma \tag{14}$$

A Figura 11 ilustra as relações entre as amostragens via iCDF, e via CDF, para criar amostragens obedecendo a PDF para distribuições normais.

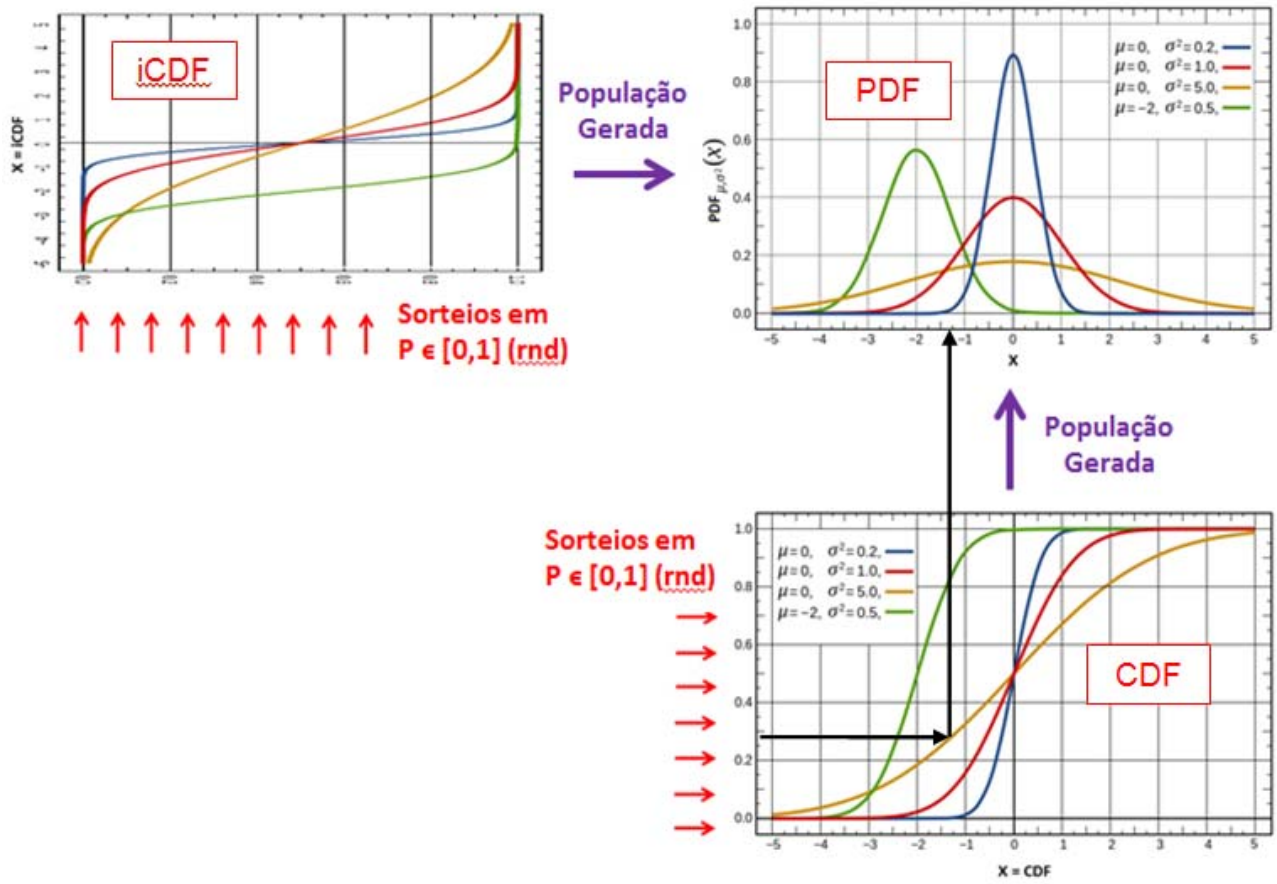


Figura 11. Relações entre as Funções iCDF, CDF e PDF da Distribuição Normal.

3. SIMULAÇÃO DE PROCESSAMENTO OFFSHORE DE GÁS NATURAL

3.1.1. Diagrama de Blocos

Para o processamento *offshore* de gás natural proposto nesta dissertação, foi considerada como corrente de carga o gás natural livre de óleo advindo do separador trifásico, sendo tomado como base o processo descrito por MACHADO *et al.* (2012), que propõe a separação de água do gás natural através de desidratação de TEG e separação de condensáveis através de expansão Joule-Thomson. Todavia, como o processo utilizado em MACHADO *et al.* (2012), opera com gás de baixo teor de CO_2, e sendo objeto deste trabalho o processamento de gás com teores altos de CO_2, complementou-se o processo proposto por MACHADO *et al.* (2012) com a separação de CO_2 através de dois estágios de baterias de módulos de membranas, opção mais apropriada para remover CO_2 nas condições em questão segundo Yeo *et al* (2012).

O processamento inicia-se com a compressão do gás natural proveniente do separador trifásico, seguindo-se sua entrada na desidratação com TEG. O TEG rico em água é, em seguida, regenerado, gerando gás resíduo para *flare*, enquanto o gás natural seco segue para a etapa de separação de condensáveis, que extrai corrente rica em condensáveis (NGL). Por fim, o gás natural seco e leve passa, na última etapa, pela remoção de CO_2 através dos dois estágios MP, gerando a corrente final de gás natural especificado e o permeado rico em CO_2 que passará por compressão para destinação à EOR. A Figura 12 mostra o processamento *offshore* de gás natural em diagrama de blocos.

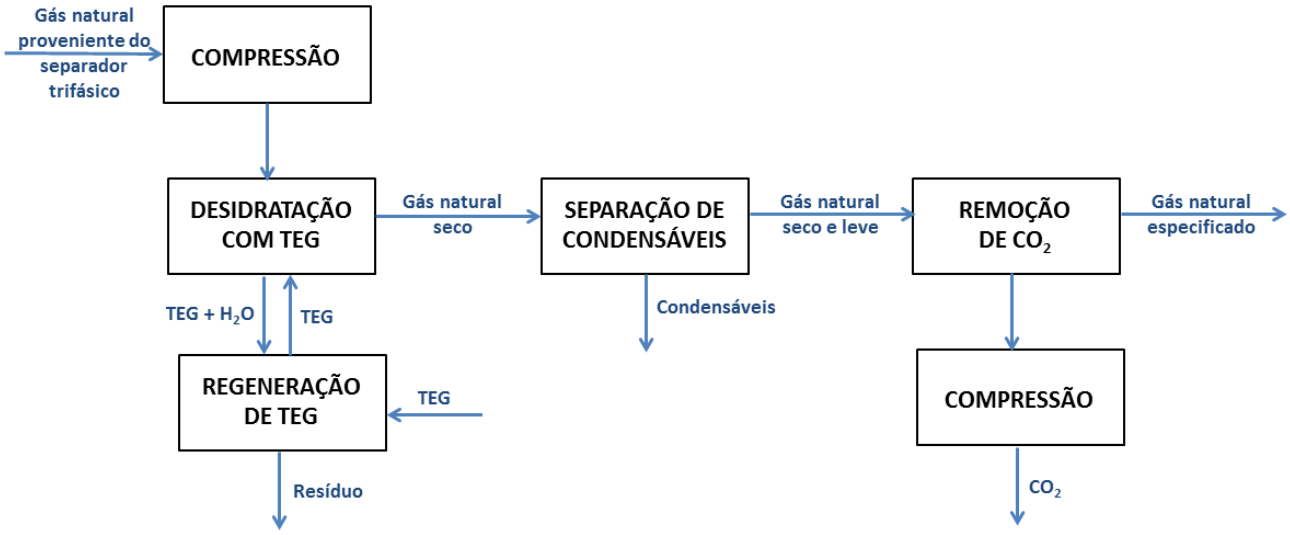


Figura 12. Diagrama de Blocos para Processamento de Gás Natural.

3.1.2. Especificações do Gás Natural

As especificações do gás natural foram baseadas na Resolução ANP nº 16 de 2008, considerando-se a região Sudeste. Para a corrente final de gás de exportação, as especificações mais relevantes a serem atendidas são:

- Ponto de orvalho da água (WDP): -45°C a 1 atm;
- Ponto de orvalho de hidrocarbonetos (HCDP): 0°C a 45 bar;
- Fração molar máxima de CO_2: 3,0%;
- Fração molar mínima de C1: 85%.

3.1.3. Requisitos para Meio Ambiente, Segurança Operacional e Análise de Risco

Em processamento *offshore* de gás natural, a energia elétrica utilizada para alimentação dos sistemas de compressão, que representam o consumo de energia mais significativo deste processo, é advinda da queima de gás natural produzindo CO_2. Além disso, este mesmo consumo de energia elétrica por compressores, que são equipamentos de grande porte, com grande consumo de eletricidade, também é considerado um fator sensível para segurança operacional e análises de risco. Em outras palavras, quanto mais compressão embarcada, maior a geração de eletricidade nos *turbo-shafts* a gás natural, maior a potencia elétrica total que deve ser cabeada, transformada e estabilizada, e maiores os riscos operacional e ambiental. Desta maneira, quanto menor o consumo de energia pelos sistemas de compressão, mais ecologicamente limpo e mais operacionalmente seguro é considerado o processo.

3.1.4. Definição das Variáveis de Monte Carlo

Muitas são as incertezas que compõem o quadro probabilístico do processamento de gás natural em plataformas *offshore* em águas profundas e distantes da costa. Naturalmente há variáveis não-determinísticas de alta periculosidade que são associadas às operações *offshore* em águas profundas, como os riscos ponderáveis de operações *sub-sea*, o quadro meteorológico em alto mar e os aspectos da estabilidade da embarcação tendo em vista ventos, ciclones, etc. Há também as variáveis probabilísticas do contexto *top-side* que afetam apenas o processamento de gás enquanto processo químico, tais como as listadas abaixo:

- Condições da carga de gás, livre de óleo, advindo do separador trifásico da plataforma:
    - Vazão;
    - Composição;
- Preço de venda do gás natural final gerado pela unidade de processamento;
- Mercado consumidor do gás final;
- Custo com equipamentos embarcados:
    - Tecnologia de separação por módulos de membranas;
    - Custos com compressores.

Essa Dissertação optou por considerar apenas as incertezas do contexto *top-side* relacionadas à carga do gás bruto, livre de óleo, proveniente do separador trifásico da plataforma. Foram admitidas populações randômicas obedecendo a padrões de Distribuição Normal independentes (i.e. não correlacionados) para duas variáveis desta carga:

- Vazão ($MMsm^3/d$);
- Fração molar de CO_2.

A população de vazões obedece a uma Distribuição Normal de média μ = 6,0 $MMsm^3/d$ e desvio padrão σ = 1 $MMsm^3/d$, significando que o domínio de vazões é de 3,0 a 9,0 $MMsm^3/d$. Já a população de CO_2 obedece a uma Distribuição Normal de μ = 0,20 e desvio padrão σ = 0,03, significando que o domínio de frações molares de CO_2 é de 0,10 a 0,30. A Figura 13 ilustra a PDF da população de vazões ($MMsm^3/d$) e a Figura 14 ilustra a PDF de frações molares de CO_2.

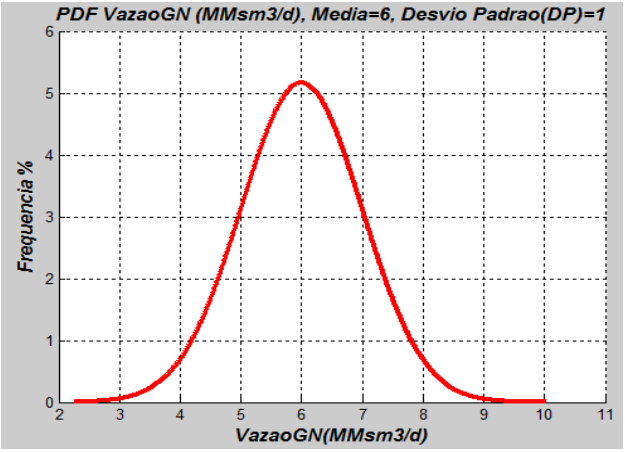


Figura 13. PDF de Vazões do Gás Natural de Entrada (MMsd/m³).

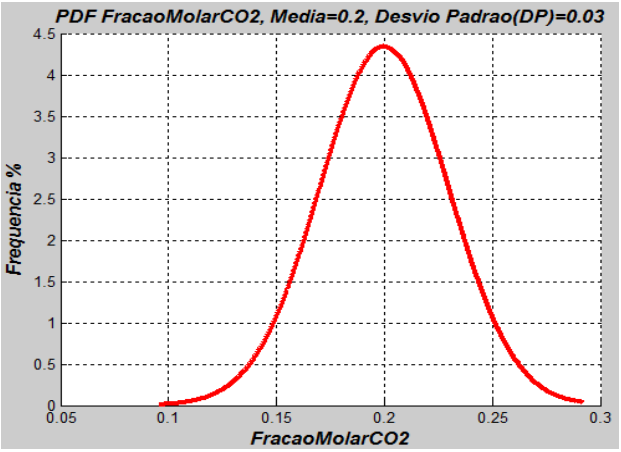


Figura 14. PDF de Frações Molares de CO_2 do Gás Natural de Entrada.

3.1.5. Simulação do Caso Base no Software HYSYS

A simulação do caso base do processamento *offshore* de gás natural foi realizada no software de simulação de processos HYSYS 2006 (20.0.0.6728) no modo estacionário. A nomenclatura dos componentes utilizada na simulação está descrita na Tabela 3.

Tabela 3 – Nomenclatura dos Componentes da Simulação no Software HYSYS.

Siglas	Descrição
Correntes	
CP	Corrente de Processo
CE	Corrente de Energia
Equipamentos	
B	Bomba
C	Compressor
E	Trocador de Calor
MB	Módulo de Membranas
T	Coluna
V	Vaso
Componentes de Tubulação	
MIX	Misturador
VLV	Válvula manual
Operações Lógicas	
RCY	Reciclo
SET	Ajuste

Dois pacotes termodinâmicos foram utilizados para essa simulação:

- *Peng-Robinson* (PR) para o fluxograma em geral;
- *Glicol Package* (GLI) para as colunas de TEG.

O processo possui duas correntes de entrada:

- Gás natural, livre de óleo, proveniente do separador trifásico, denominada CP-001 (GN seco despress.);
- TEG puro, denominada CP-034 (TEG *make up*).

Para simulação do caso base, foram considerados os valores das médias μ das variáveis independentes, sujeitas a incertezas, vazão e fração molar de CO_2. A Tabela 4 mostra a composição e a vazão do gás natural de entrada, em base seca.

Tabela 4 – Vazão e composição do gás natural de entrada.

Vazão	6 (MMsm³/d)
Componente	**Fração Molar**
CO2	0,200000000
C1	0,778822778
C2	0,011989307
C3	0,003551997
iC4	0,000901078
nC4	0,000790451
iC5	0,000386277
nC5	0,000209156
nC6	0,000242568
nC7	0,000367924
nC8	0,000238377
nC9	2,29995E-05
N2	0,002477087

A unidade MMsm³/d de vazão se refere à vazão volumétrica do gás natural nas condições *standard* de temperatura 20°C e pressão 1 atm. Como esta não é uma grandeza possível de ser preenchida em correntes HYSYS diretamente, é necessário convertê-la para vazão molar. Considerando-se tais condições *standard,* pode-se assumir que o gás natural tenha comportamento de gás ideal. As Eqs. (15) a (22) demonstram o fator de conversão de 1 MMsm³/d para kgmol/h.

$$1\ sm^3 = 1000\ sl \quad \textbf{(15)}$$

$$R = 0{,}08205\ \frac{atm.l}{mol.K} \quad \textbf{(16)}$$

$$P.V = n.R.T \rightarrow n = \frac{P.V}{R.T} \quad \textbf{(17)}$$

$$n = \frac{1\ atm\ .1000\ l}{0{,}08205\ \frac{atm.l}{mol.K}.\ (20+273{,}15)K} \quad \textbf{(18)}$$

$$n = 41.5749\ mols = 0{,}0415749\ kgmol \quad \textbf{(19)}$$

$$1\ sm^3 = 0{,}0415749\ kgmol \quad \textbf{(20)}$$

$$\frac{1\ MMsm^3}{d} = \frac{0.0415749\ kgmol\ .10^6}{24h} \quad \textbf{(21)}$$

$$\frac{1\ MMsm^3}{d} = 1732{,}288708\ \frac{kgmol}{h} \quad \textbf{(22)}$$

O processo se inicia com a compressão da corrente de gás natural, CP-001, advinda do separador trifásico, para a pressão da coluna de absorção com TEG, T-001. Esta etapa de compressão possui consumo de energia elétrica considerável no consumo total do processo. A Figura 15 mostra essa etapa.

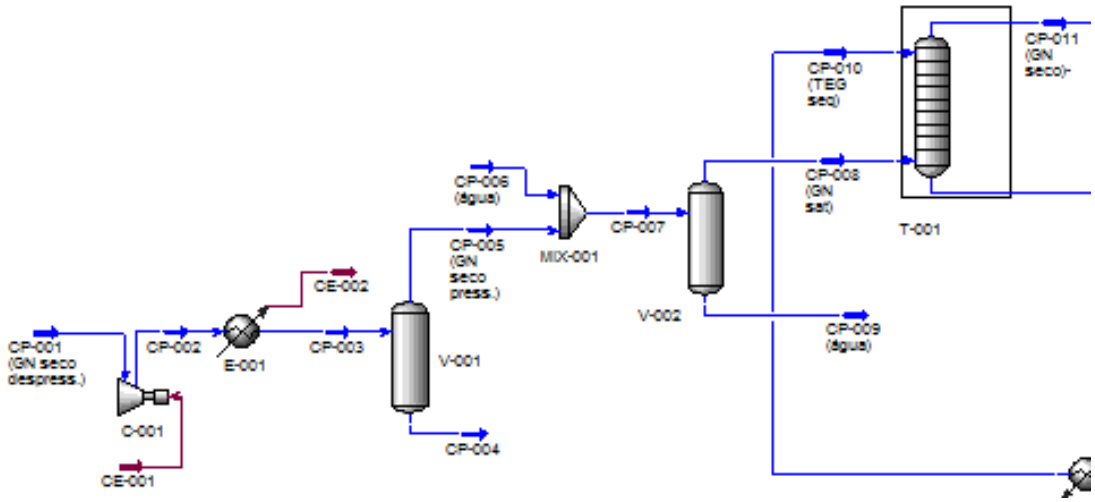


Figura 15. Etapa de Compressão do Gás Natural de Entrada.

A corrente de entrada de gás natural, CP-001, em pressão de 20 bar e temperatura de 25 °C é comprimida em um estágio pelo compressor C-001, até a pressão de 70,5 bar. Após a compressão, esta é resfriada pelo resfriador E-001 para sua temperatura inicial de 25 °C e pressão de 70 bar, pressão de operação da coluna de absorção com TEG, T-001. A perda de carga de 0,5 bar se deve à passagem da corrente pelo resfriador. Após o resfriamento, o gás segue então para o vaso de *knock-out*, V-001, para expansão e separação de possíveis líquidos, encerrando assim esta etapa de compressão. Como também mostrado na Figura 15, o gás que passa por esta etapa de compressão é um gás seco. No entanto, o gás advindo do separador trifásico real é um gás úmido. Para garantir a saturação em água do gás, foi adicionada uma corrente de água líquida ao gás seco e essa mistura foi alimentada ao vaso V-002 para reter o excesso de líquido, resultando na corrente CP-008, que contém gás pressurizado e saturado em água para entrada na

coluna de absorção com TEG, T-001. É importante ressaltar que essa etapa de adição de água não é uma etapa física do processo, sendo incluída apenas para garantir a saturação do gás em água nos cálculos do processo a jusante, de forma a emular a verdadeira condição do gás úmido proveniente do separador trifásico água-óleo-gás a montante.

Outro ponto de destaque é a utilização aquecedores elétricos em vez de trocadores de calor utilizando vapor de água como utilidade quente, o que seria uma opção mais barata e convencional. Aquecedores elétricos estão sendo usados neste processo porque esta é exatamente a opção de aquecimento em plataformas *offshore*, uma vez que a utilização de caldeiras para geração de vapor se constituiu um risco muito grande de operação. Por este motivo, tais cargas térmicas irão se somar ao consumo de eletricidade de acionamento de máquinas como compressores e bombas, visto que o consumo de energia elétrica total é uma variável resposta importante na análise MMC que será realizada com base nessa simulação.

Em seguida, as etapas de absorção da água do gás natural saturado com TEG e de regeneração de TEG estão ilustradas na Figura 16.

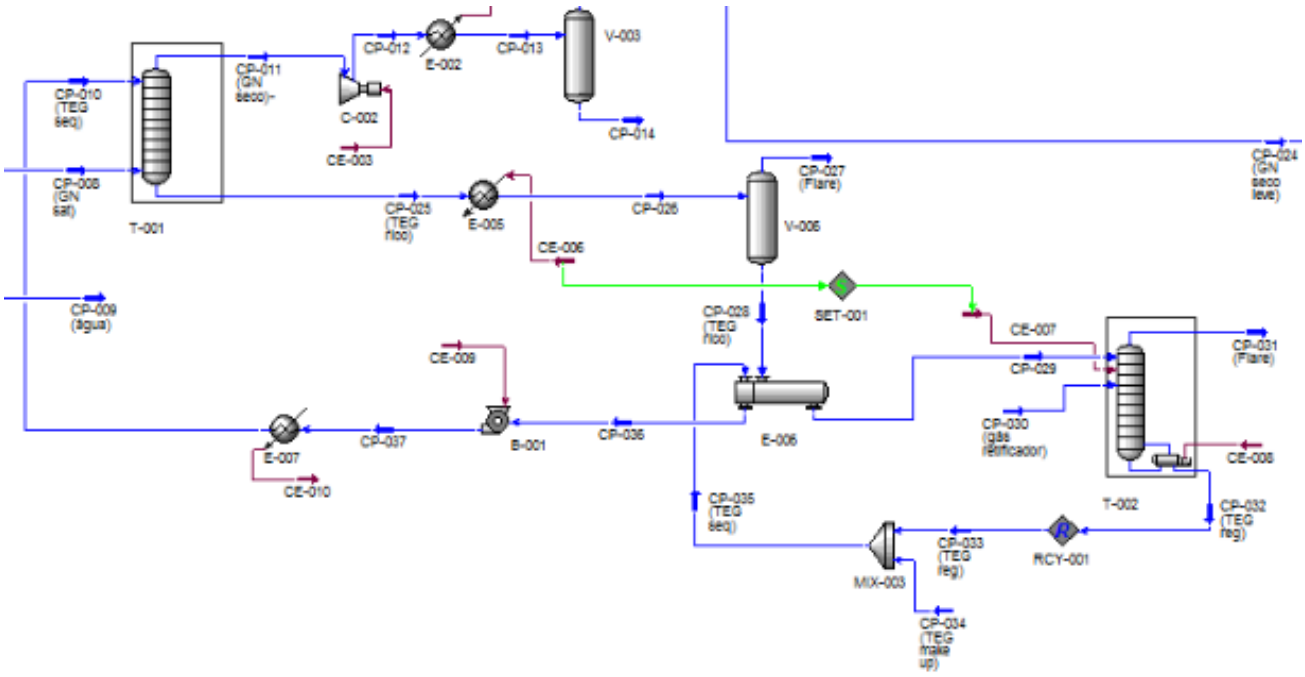


Figura 16. Etapas de Absorção com TEG e regeneração de TEG.

A coluna de absorção T-001, com 6 estágios e operada a 70 bar, é alimentada no fundo pela corrente de gás natural saturado CP-008 e, no topo, pela corrente de TEG

sequestrante de água (concentrada em 99,3%w/w TEG) CP-010. O gás natural seco sai pelo topo da coluna através da corrente CP-001, que segue para processo de separação de componentes condensáveis. A corrente de fundo da coluna, CP-025, contém TEG rico em água, que é encaminhado para a etapa de regeneração para remoção da água adquirida na etapa de absorção. A corrente CP-025, contendo TEG rico em água é então aquecida pelo aquecedor E-005 e, em seguida, após *knock-out* para eliminação de gases para *flare*, é encaminhada para uma segunda troca térmica, em um processo de recuperação energética, através do trocador de calor E-006. Este a aquece até a temperatura de 140ºC quando entra na coluna T-002, através da corrente CP-029, para seu esgotamento e regeneração.

A coluna de regeneração de TEG T-002, de 8 estágios e operada a 2 bar, recebe a corrente quente de TEG rico pelo topo, sendo alimentada pela corrente de energia CE-007. No fundo da coluna também há entrada da corrente CP-030, contendo gás de esgotamento para aumentar a eficiência de remoção de água do TEG. No topo da coluna é originada a corrente CP-031, que contém componentes gasosos e é encaminhada para *flare*. No fundo da coluna, TEG regenerado com 99,3%w/w deixa a coluna através da corrente CP-032. Este TEG é recirculado para a coluna de absorção.

O TEG regenerado, sequestrante, é misturado a uma corrente de *make-up*, CP-034, de baixa vazão, somente para suprir as perdas de TEG no processo de absorção/regeneração, e resfriado no mesmo trocador de recuperação energética, E-006. Após o resfriamento, o TEG sequestrante é bombeado por B-001, sofre uma segunda etapa de resfriamento através do resfriador E-007 visto que a troca térmica anterior não teria sido suficiente para chegar à temperatura desejada de 40°C, para entrada na coluna de absorção T-001 a 70 bar.

Voltando à coluna de absorção T-001, o processo de separação de condensados do gás natural seco que sai pelo seu topo está ilustrado na Figura 17.

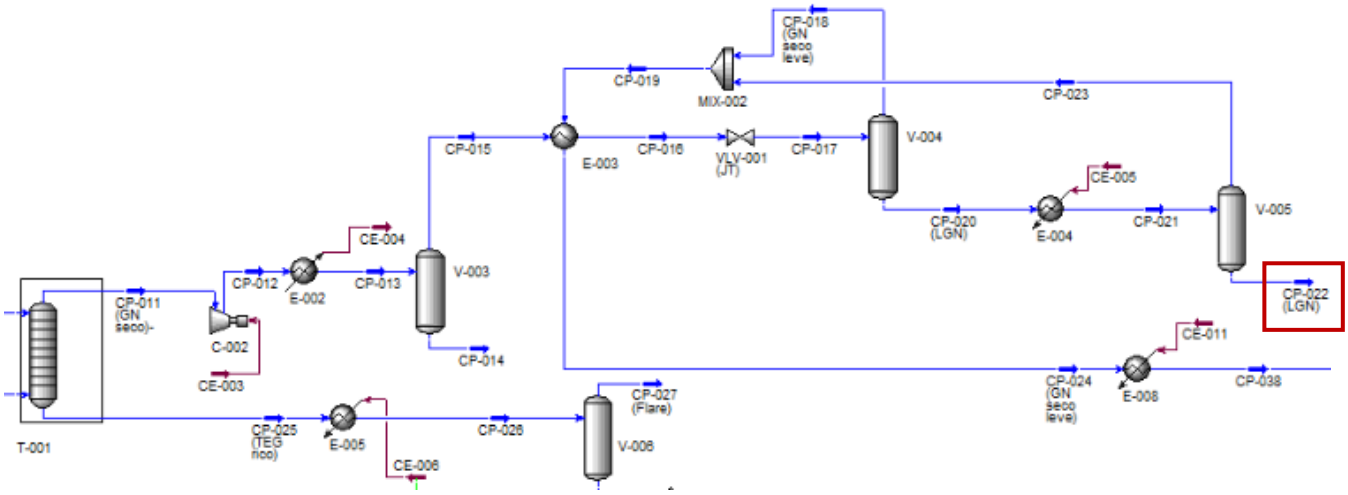


Figura 17. Etapa de Separação de Condensáveis do Gás Natural Seco.

Como mostra a Figura 17, a corrente de gás natural seco CP-001, advinda da coluna T-001 a 24,8°C e 70 bar, passa por um estágio de compressão através do compressor C-002, resfriador E-002 e vaso de *knock-out* V-003, saindo a 40°C e 119,5 bar. Este estágio de compressão se fez necessário, pois somente a expansão *Joule-Thomson* (J-T) na pressão de 70 bar, descrita a seguir, não seria suficiente para atender a ambas as especificações de WDP e HCDP do gás natural final.

Na expansão J-T, a corrente de gás seco após compressão CP-015 é resfriada pelo trocador de calor de recuperação de frio E-003 para 11,2°C para então sofrer expansão isentálpica ao passar pela válvula J-T, VLV-001, e sair a -33,6°C e 40 bar através da corrente CP-017. Esta corrente CP-017 é então alimentada ao vaso V-004, resultando na corrente CP-018 de gás natural seco saindo pelo topo e na corrente CP-020, de condensáveis (NGL), saindo pelo fundo. A corrente CP-020 de condensáveis é então aquecida a 40°C pelo aquecedor E-004 e é separada através do vaso V-005. A nova corrente de condensáveis CP-022, advinda do fundo do vaso V-005 a 40°C e 39,5 bar, ressaltada em vermelho na Figura 17, é a corrente final de condensáveis para comercialização.

Em relação à formação de hidratos na expansão J-T, a corrente de entrada desta etapa, CP-016, possui fração molar de 1,2 x 10^{-4} de água, teor este derivado da etapa de desidratação com TEG. Ao passar pela expansão J-T, a queda de temperatura para -3,6 °C deixa praticamente toda a água dessa corrente sob a forma de traços de gelo ou hidrato no fundo do separador, gerando a corrente CP-020. Esta, por sua vez, ao passar

pelo aquecedor E-004, irá produzir água livre líquida, sem hidratos, confome verificado pela ferramenta "*Hydrate Formation Utility*" do HYSYS.

Já a corrente de gás natural CP-023 proveniente do topo do vaso V-005 é então misturada à corrente CP-018, proveniente do topo do V-004, para que a corrente resultante de gás natural seco e leve, CP-019, seja aquecida pelo mesmo trocador de recuperação energética E-003 para 3,7°C.
Como este aquecimento não é suficiente para levar o gás para a temperatura de entrada da nova etapa, remoção de CO_2 por módulos de membranas, o gás natural seco e leve é então aquecido por E-008 para 40°C, resultando na corrente CP-038, que é encaminhada para os módulos de membrana, como mostra a Figura 18.

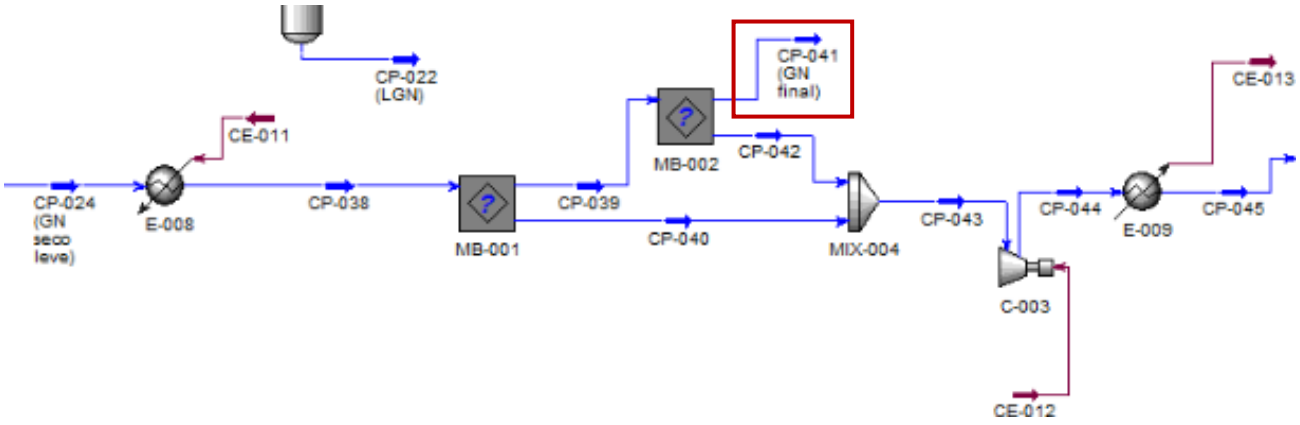


Figura 18. Etapa de Remoção de CO_2 para Geração do Gás Natural Especificado.

O HYSYS não possui operação unitária para representar módulo de membrana. Dessa maneira foi utilizado um bloco do tipo *User Unit Op* (MEDEIROS, 2013) para representar o balanço de massa e energia de membranas operando em contra-corrente. Este bloco customizado é um exemplo bem claro do conceito de ***Extensibility*** do HYSYS, uma vez que representa uma operação unitária que é solucionada ao longo da simulação, como qualquer outro objeto da mesma. Nos módulos de membrana, foram utilizadas permeabilidades fixas, independentes de pressão e temperatura.

Para separação de CO_2 do gás natural são necessários dois módulos de membrana operando em contra-corrente, MB-001 e MB-002. A área de troca do primeiro módulo de membranas é necessária ser de 1,1 x 10^6 m^2 e a do segundo, a metade deste valor, 5,5 x 10^5 m^2. A corrente de retentado do segundo módulo de membranas CP-041, ressaltada em vermelho na Figura 18 é a corrente final de gás natural especificado pela ANP para

comercialização: desidratado obedecendo às especificações de WDP, leve, obedecendo HCDP e ao teor mínimo de C1 e contendo CO_2 abaixo do teor máximo permitido.

Já as correntes de permeado de ambos os módulos de membranas, CP-040 e CP-042, a 1 bar, representam o CO_2 a ser reinjetado nos poços de EOR. Elas são então misturadas, gerando a corrente CP-043, a ser comprimida até chegar à pressão mínima de reinjeção de 250 bar. Para realizar tal compressão, são necessários cinco estágio de compressão, cada um composto pelo conjunto compressor, resfriador e vaso de *knock-out*, como mostra a Figura 19.

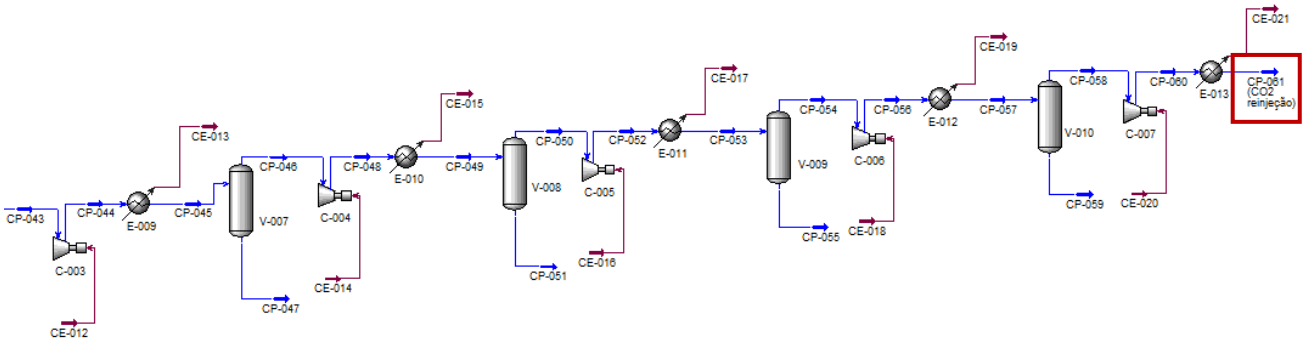


Figura 19. Etapa de Compressão do CO_2 até a Pressão de Reinjeção no Poço.

A corrente de saída dos cinco estágios de compressão CP-021, ressaltada em vermelho na Figura 19 representa o CO_2 pressurizado para reinjeção no poço.

Em complemento ao processamento offshore de gás natural descrito acima, o Anexo 8.1 apresenta sumários com os principais componentes da simulação descrita neste Capitulo.

3.1.6. Simulações em Batelada

O desenvolvimento da simulação para atender às especificações necessárias no Caso Base contempla especificações da carga de gás bruto pelas médias das distribuições probabilísticas das duas variáveis independentes da análise MMC estudada nesta dissertação, a saber: vazão molar e fração molar de CO_2 da corrente de gás natural de entrada do processo. Todavia, algumas considerações são necessárias no que diz respeito à realização de simulações em modo batelada ao longo das amostragens destas variáveis independentes.

.

3.1.6.1. Composição do Gás Natural

À medida que a fração molar de CO_2 é amostrada, a fração molar dos demais componentes também deve ser alterada. Desta maneira, foi adotado um fator de proporção fixo entre as frações molares dos demais componentes, desconsiderando a fração molar de CO_2. Este fator é constante ao longo de todas as amostragens MMC, como mostra a Eq. (23).

$$fat_{componente} = \frac{x_{componente}}{1-x_{CO2}} \quad \textbf{(23)}$$

Considerando-se a Eq. (23) e tomando como base a composição apresentada na Tabela 4, os fatores de ponderação dos demais componentes do gás natural de entrada se encontram na Tabela 5.

Tabela 5 – Vazão e composição do gás natural de entrada.

Componente	Fator de Proporção
C1	0,973528472
C2	0,014986634
C3	0,004439997
iC4	0,001126348
nC4	0,000988063
iC5	0,000482846
nC5	0,000261446
nC6	0,00030321
nC7	0,000459905
nC8	0,000297971
nC9	2,87494E-05
N2	0,003096359

3.1.6.2. Dimensionamentos Fixos

O dimensionamento foi realizado para atender às especificações necessárias considerando o Caso Base. Como o objetivo desta dissertação é a apresentação da MMC para dimensionamento de um processo a partir de um Caso Base consistente, não cabe reiteradamente redimensionar o fluxograma de processo para atender a todos os casos das amostragens MMC, pois isso significaria, eventualmente, projetar uma planta de custo infinito. No entanto, ressalta-se que algumas premissas de dimensionamento são fixadas pois são críticas para caracterizar o projeto sendo testado quanto ao atendimento das

especificações. Os principais dimensionadores críticos do processo proposto para processamento *offshore* de gás natural são:

- Área dos módulos de membranas;
- Razão de compressão antes da expansão de J-T;
- Fator de expansão na válvula de J-T;
- Razão de compressão do CO2 antes da reinjeção no poço;
- Número de estágios e pressão de operação da coluna de absorção com TEG;
- Número de estágios e pressão de operação da coluna de regeneração de TEG;
- Pureza do TEG regenerado;
- Pressão de entrada nos módulos de membranas;
- Pressão da corrente de permeado;
- Temperatura da corrente de entrada nos módulos de membranas.

4. DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÕES EM BATELADA E ANÁLISE DE MONTE CARLO

De modo a viabilizar que MMC seja realizado de maneira correta, é necessário que uma grande amostragem de valores aleatórios das variáveis de entrada do processo seja gerada, administrada e posteriormente seja processada estatisticamente gerando figuras e resultados estatísticos. Este é o arcabouço APP-VB-XML-HYSYS-MATLAB citado no Capítulo 1 para conduzir a análise MMC. A ferramenta computacional APP-VB-XML-HYSYS-MATLAB foi desenvolvida em linguagem VB .NET implementada em .NET *framework* no *Visual Studio*. Esta ferramenta, comercialmente denominada "***MCAnalysis"***, é considerada um tipo de ***Automation*** para o software de simulação de processos HYSYS, conforme descrito no item 2.2.1. "***MCAnalysis"*** é composta por dois módulos: o primeiro módulo foi projetado para executar a geração de amostragens pseudo-randômicas das variáveis independentes não-determinísticas, seguindo-se a utilização do software HYSYS para geração de amostragens das respostas do processo em modo *batch*. O segundo módulo destina-se a realizar a análise MMC em ambiente MATLAB. A Figura 20 mostra a interface inicial da ferramenta "***MCAnalysis"***, onde é possível escolher qual dos módulos se deseja usar.

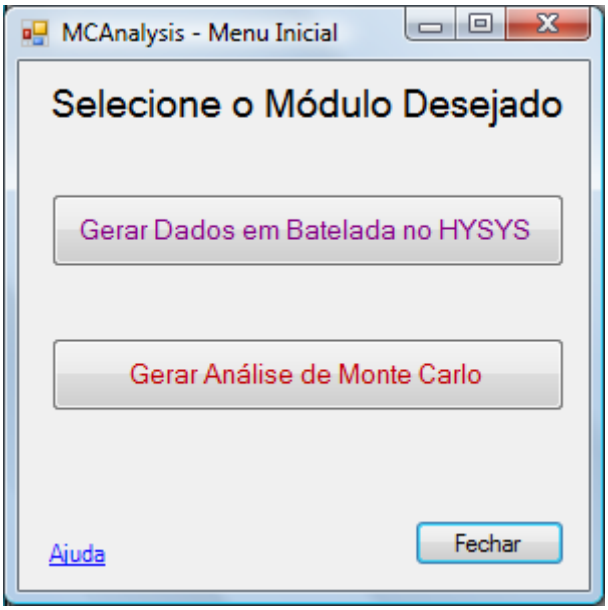


Figura 20. Interface Inicial da Ferramenta Computacional MCAnalysis.

"***MCAnalysis"*** poderia ter sido idealizada de forma mais simplista e direta, de modo a proporcionar os resultados em batelada de interesse especificamente para a simulação de processamento *offshore* de gás natural desenvolvida nesta dissertação. No entanto, foi

preferível realizar um esforço adicional para realizar um desenvolvimento mais genérico, de modo a possibilitar sua aplicação em diversas simulações no software HYSYS em trabalhos futuros. Dessa maneira, foi utilizada interface com arquivos XML com o objetivo de que estes contenham todos os dados específicos tanto da simulação quanto dos parâmetros de interesse para análise MMC, evitando que tais informações fossem definidas diretamente no código fonte da ferramenta "***MCAnalysis"***, o que a tornaria específica para este caso de estudo.

4.1. Módulo de Geração de Dados em Batelada no HYSYS

A interface do primeiro módulo da ferramenta "***MCAnalysis"***, denominado "Gerar Dados em Batelada no HYSYS" está ilustrada na Figura 21.

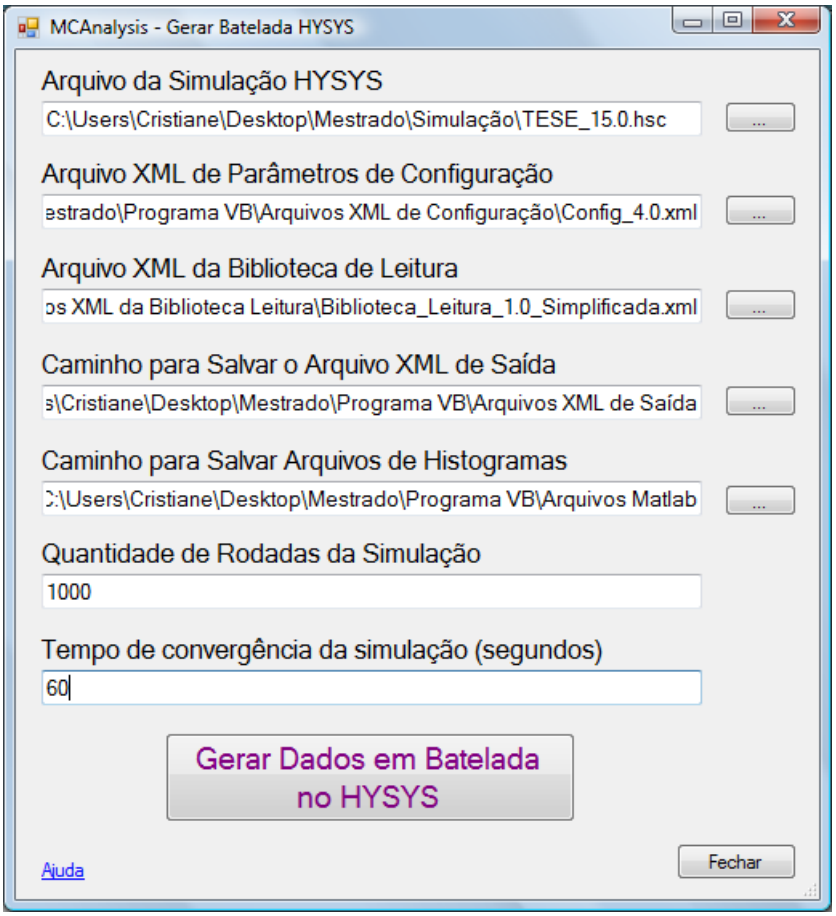


Figura 21. Interface do Módulo de Geração de Dados em Batelada no HYSYS.

Os campos requeridos na Figura 21 ficam mais claros quando se entende o algoritmo geral deste módulo, descrito pela Figura 22.

Já o campo de tempo de convergência da simulação, em segundos, foi um artifício utilizado para otimizar o tempo de processamento da ferramenta computacional. Este tempo se refere a uma estimativa de tempo de convergência da simulação. Como a ferramenta precisa ter certeza da convergência de uma simulação antes do processamento da simulação seguinte, a convergência só é verificada após a passagem do tempo informado, evitando processamento de verificação da mesma neste período de tempo.

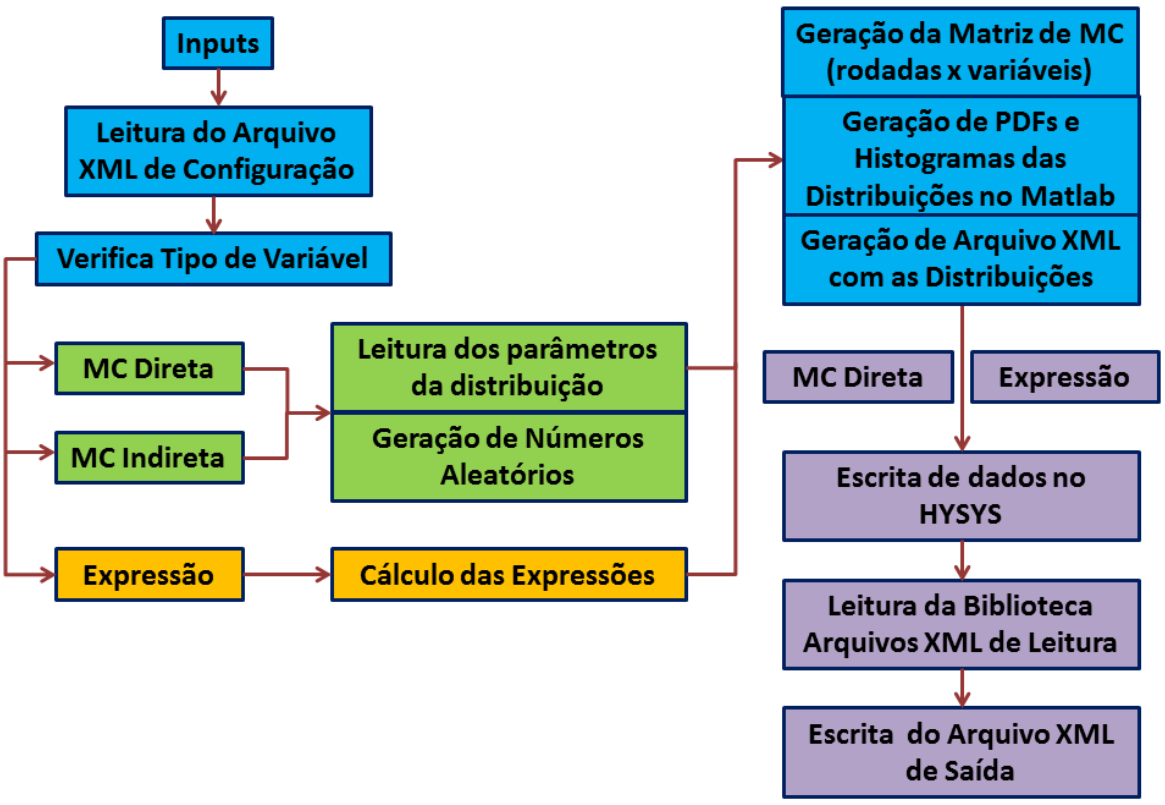


Figura 22. Algoritmo Geral do Módulo de Geração de Dados em Batelada.

Em resumo, este módulo, composto pela classe “GerarBateladaHysys”, é iniciado com o preenchimento das informações disponíveis em sua tela de interface e a seleção do botão “Gerar Dados em Batelada no HYSYS”, evento que dispara a execução da primeira rotina da classe. A Figura 23 ilustra a abertura da classe do módulo e a rotina referente ao evento de seleção do botão.

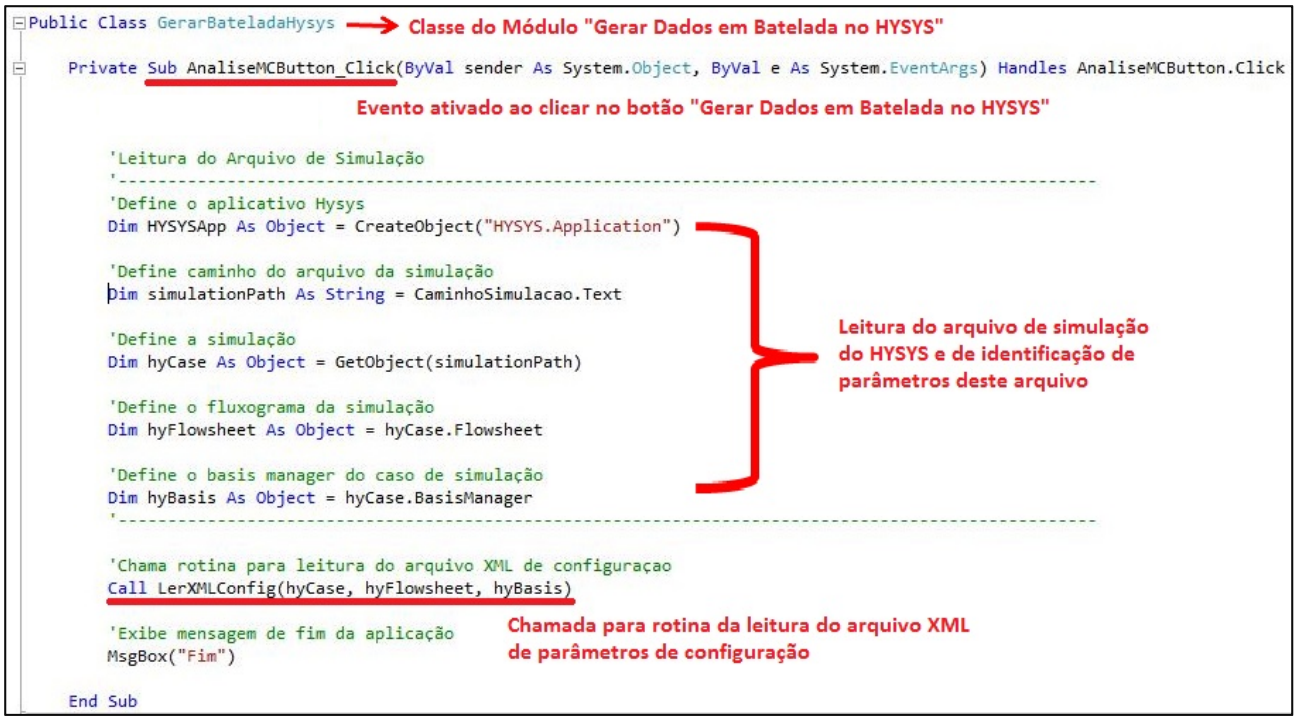


Figura 23. Inicialização da Classe “GerarBateladaHysys”.

A primeira rotina do módulo identifica o arquivo da simulação do HYSYS de interesse e chama a rotina para leitura de um arquivo XML contendo os parâmetros de configuração para identificar quais variáveis serão alteradas na simulação. A leitura deste arquivo XML de configuração se encontra detalhada no item 4.1.1. Durante a leitura do arquivo, para o caso de variáveis do tipo MC Direta e Indireta, seus parâmetros de distribuição normal (μ e σ) são lidos e números aleatórios são gerados (item 4.1.2), enquanto que, para variáveis do tipo expressão, uma rotina para cálculo de expressões é executada (item 4.1.3). Durante esse processo, é gerada também uma matriz contendo os valores de todas as variáveis definidas no arquivo XML de configuração, denominada matriz de MC, que configuram os dados para geração das PDFs das distribuições normais no software MATLAB, além da geração de um arquivo de XML contendo os dados desta matriz, agrupados por variáveis (item 4.1.4). Esta pode ser considerada a primeira etapa de execução do módulo (etapas identificadas em azul na Figura 22).

A segunda etapa é aplicável somente para as variáveis do tipo MC direta ou Expressão, em que os dados gerados e armazenados na matriz de MC referentes a essas variáveis, são preenchidos no HYSYS para geração de múltiplas simulações a partir da leitura de um arquivo XML contendo biblioteca de leitura e um arquivo XML contendo os dados de saída das múltiplas simulações é gerado (item 4.1.5).

4.1.1. Leitura do Arquivo XML de Parâmetros de Configuração

4.1.1.1. Configuração do Arquivo XML

De forma a garantir que a ferramenta desenvolvida seja genérica e tenha a habilidade de manipular o software HYSYS para geração de dados em batelada, é necessário fornecer um conjunto básico de parâmetros de configuração contendo as variáveis de entrada a serem alteradas na simulação. Para tal, foi desenvolvido um arquivo XML de configuração, cuja estrutura de organização dos parâmetros é genérica e, ao mesmo tempo, engloba dados específicos da simulação. Este arquivo é utilizado para definição dos dados da simulação desejada, evitando que sejam feitas alterações no código fonte da ferramenta para atender a especificidades da simulação. No caso de a padronização do arquivo XML de configuração não atender a alguma simulação específica, a estrutura do mesmo deve ser revista de modo a aumentar ainda mais sua capacidade de generalização. Arquivos desse tipo aumentam de complexidade à medida que muitos dados da simulação precisam ser alterados e também quanto mais relacionados estes dados são.

Para desenvolvimento da estrutura deste arquivo, foi necessário definir a classificação das variáveis de entrada envolvidas na simulação, conforme descrito abaixo:

- **Monte Carlo**: Variáveis definidas para realização da análise de Monte Carlo, que variam aleatoriamente e obedecem a uma distribuição normal.
    - **Diretas**: Variáveis correspondentes a propriedades existentes no HYSYS, cujos valores podem ser diretamente alterados na simulação.
    - **Indiretas**: Variáveis que não correspondem a propriedades existentes no HYSYS. Este tipo de variável será alterada na simulação através de expressões envolvendo variáveis existentes no HYSYS.
- **Expressão**: Variáveis existentes no HYSYS, cujos valores podem ser diretamente alterados na simulação, que não são o foco da análise MMC, mas que fazem parte de expressões que definem variáveis de Monte Carlo Indiretas ou que são impactadas por variáveis de Monte Carlo de forma geral. Podem ser impactadas por múltiplas variáveis de Monte Carlo.

A Tabela 6 ilustra as variáveis de entrada do processamento offshore de gás natural classificadas.

Tabela 6 – Variáveis de Entrada do Processamento *Offshore* de Gás Natural Classificadas.

Variável	**Classificação**
Fração molar de CO_2 da corrente de alimentação de gás natural	Monte Carlo Direta
Vazão da corrente de alimentação de gás natural	Monte Carlo Indireta
Vazão molar da corrente de alimentação de gás natural	Expressão
Fração molar de C1 da corrente de alimentação de gás natural	Expressão
Fração molar de C2 da corrente de alimentação de gás natural	Expressão
Fração molar de C3 da corrente de alimentação de gás natural	Expressão
Fração molar de iC4 da corrente de alimentação de gás natural	Expressão
Fração molar de nC4 da corrente de alimentação de gás natural	Expressão
Fração molar de iC5 da corrente de alimentação de gás natural	Expressão
Fração molar de nC5 da corrente de alimentação de gás natural	Expressão
Fração molar de nC6 da corrente de alimentação de gás natural	Expressão
Fração molar de nC7 da corrente de alimentação de gás natural	Expressão
Fração molar de nC8 da corrente de alimentação de gás natural	Expressão
Fração molar de nC9 da corrente de alimentação de gás natural	Expressão
Fração molar de N_2 da corrente de alimentação de gás natural	Expressão

Conforme definido no item 3.1.4, a vazão (MMsm³/d) e a fração molar de CO_2 da corrente de alimentação de gás natural são as variáveis independentes para análise MMC. A fração molar de CO_2 é uma variável de MC direta, pois corresponde a uma propriedade existente para correntes no HYSYS, enquanto a vazão é uma variável de MC indireta, visto que precisa ser convertida, através de uma expressão, para vazão molar, que é uma propriedade existente no HYSYS, sendo esta uma variável do tipo expressão. Já as frações molares dos demais componentes do gás dependem da fração de CO_2 para serem calculadas e também alimentadas no HYSYS, sendo incluídas como variáveis do tipo expressão.

A estrutura de nós do arquivo XML de configuração, ilustrada na Figura 24, varia de acordo com a necessidade de cada tipo de variável, sendo mais prático descrever os nós de cada variável em separado, com exceção do primeiro nó do arquivo, *Variables*. Este nó constitui uma coleção contendo os nós referentes a todas as variáveis de entrada a serem consideradas.

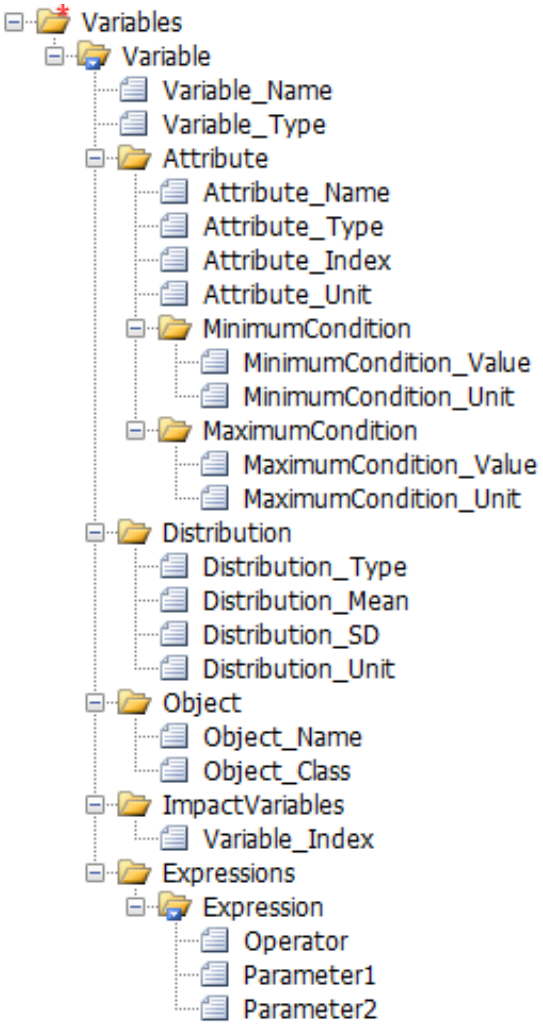


Figura 24. Estrutura de Nós do Arquivo XML de Configuração.

A Figura 25 mostra a estrutura de nós para as variáveis do tipo MC diretas.

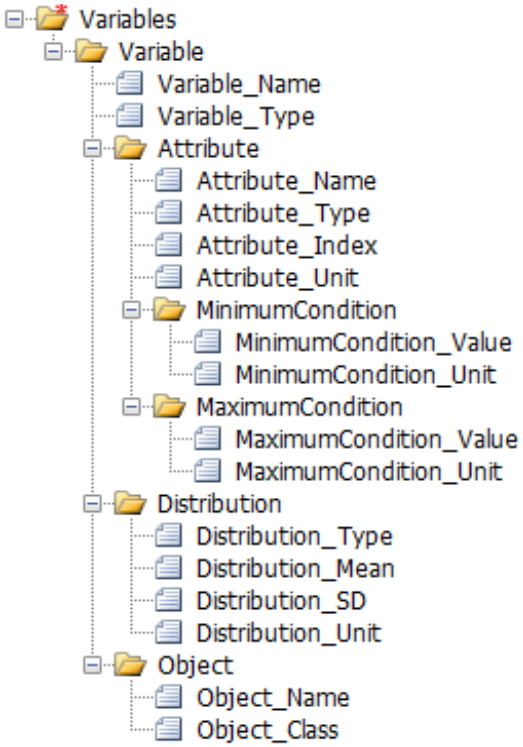


Figura 25. Estrutura de Nós de Variáveis do Tipo MC Diretas no XML de Configuração.

O primeiro nó referente à variável, ***Variable***, engloba os seguintes nós elementos:

- ***Variable_Name*:** Nome especificado para a variável;
- ***Variable_Type*:** Tipo de variável (*Monte_Carlo_Direct*, *Monte_Carlo_Indirect*, *Expression*);
- ***Attribute*:** Coleção de propriedades do atributo:
  - ***Attribute_Name*:** Nome do atributo, conforme definido na classe da biblioteca do HYSYS;
  - ***Attribute_Type*:** Tipo do atributo, conforme definido na classe da biblioteca do HYSYS. Essa informação é importante para seleção do método de escrita do valor do atributo na simulação do HYSYS. Os tipos mais relevantes são *RealVariable*, em que o atributo possui um valor e uma unidade de medida (quando aplicável) e *RealFlexVariable*, em que o atributo armazena um vetor de valores e uma unidade de medida (quando aplicável);
  - ***Attribute_Index*:** Aplicável somente para variáveis do tipo *RealFlexVariable* para indicar a posição da variável no vetor do atributo. Para variáveis do tipo *RealVariable*, este nó é preenchido como “NA”;
  - ***Attribute_Unit*:** Unidade do atributo, conforme definido na classe da biblioteca do HYSYS;

    - ***MinimumCondition***: Coleção de propriedade da condição de mínimo da variável:
        - ***MinimumCondition_Value***: Valor mínimo assumido pela variável;
        - ***MinimumCondition_Unit***: Unidade do valor mínimo da variável;
    - ***MaximumCondition***: Coleção de propriedade da condição de máximo da variável:
        - ***MaximumCondition _Value***: Valor máximo assumido pela variável;
        - ***MaximumCondition _Unit***: Unidade do máximo mínimo da variável;
- ***Distribution***: Coleção de propriedades da distribuição:
    - ***Distribution_Type***: Tipo da distribuição. A ferramenta está programada somente para distribuição normal (Normal). Caso alguma variável apresente outro tipo, este deverá ser previsto no código fonte do aplicativo e o local para este tipo de inclusão está indicado nos comentários;
    - ***Distribution_Mean***: Valor da média μ da distribuição;
    - ***Distribution_SD***: Valor do desvio padrão σ da distribuição;
    - ***Distribution_Unit:*** Unidade de ambos μ e σ da distribuição;
- ***Object***: Coleção de propriedades do objeto na simulação do HYSYS:
    - ***Object_Name***: Nome do objeto, conforme simulação no HYSYS, no qual o atributo referente à variável deve ser alterado.
    - ***Object_Class***: Classe do objeto, conforme definido na classe da biblioteca do HYSYS.

O conteúdo da variável do tipo MC direta referente à fração molar de CO_2 do gás natural de entrada no arquivo XML de configuração está detalhado na Figura 26.

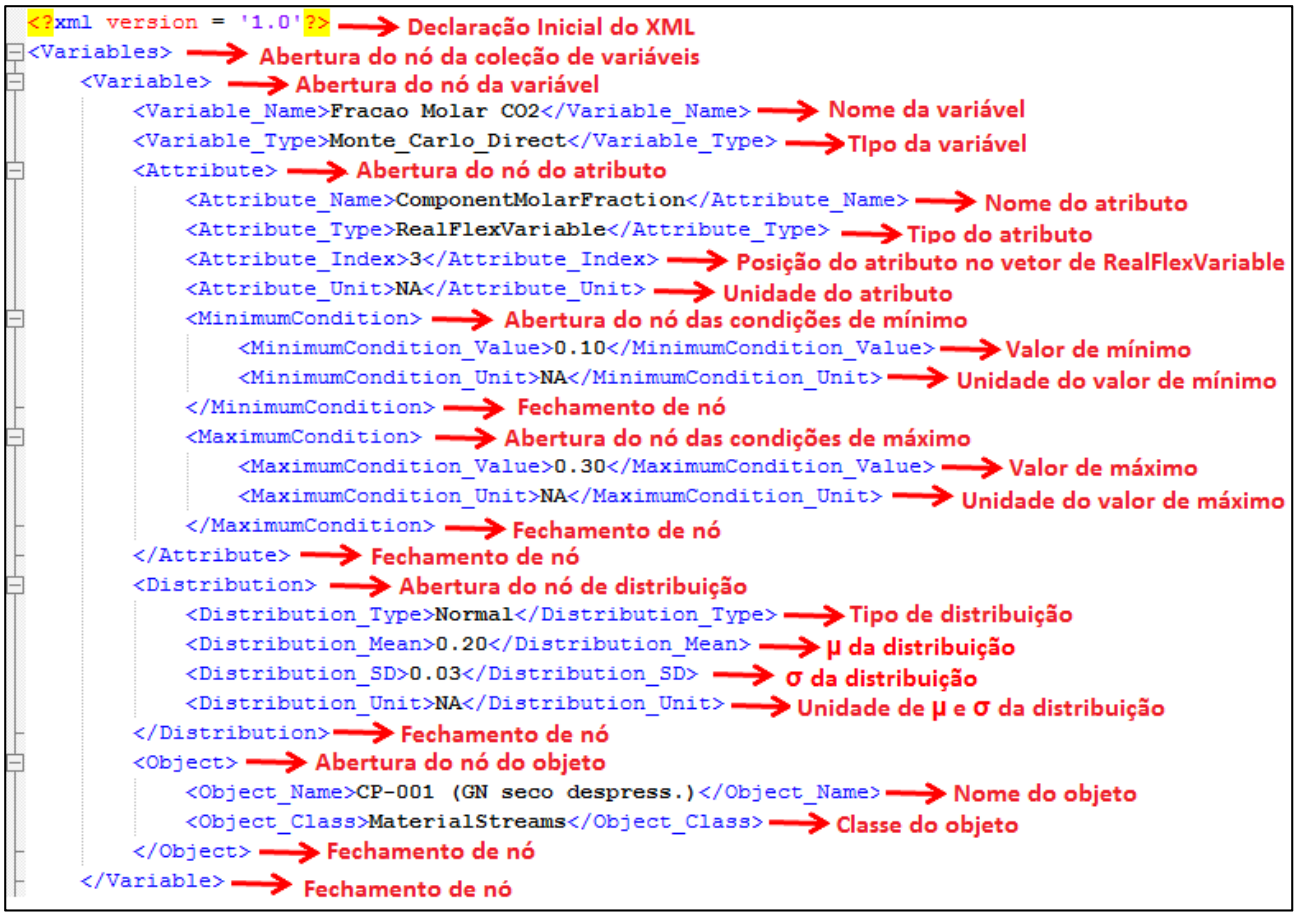


Figura 26. Variável Fração Molar de CO2 (MC Direta) no XML de Configuração.

Baseado no conteúdo exposto na Figura 26, é importante ressaltar que a fração molar de CO_2 faz parte de um atributo do tipo *RealFlexVariable* e seu índice está definido como "3", o que significa que o CO_2 é o quarto componente da corrente em questão, "CP-001 (GN seco despress.)", definida como o nome do objeto, como ilustrado pela na Figura 27 na simulação do HYSYS. Neste ponto é importante adiantar que as coleções, tanto do HYSYS quando do XML, começam a armazenar valores na posição zero, o que explica que um componente na 4ª posição possua índice 3.

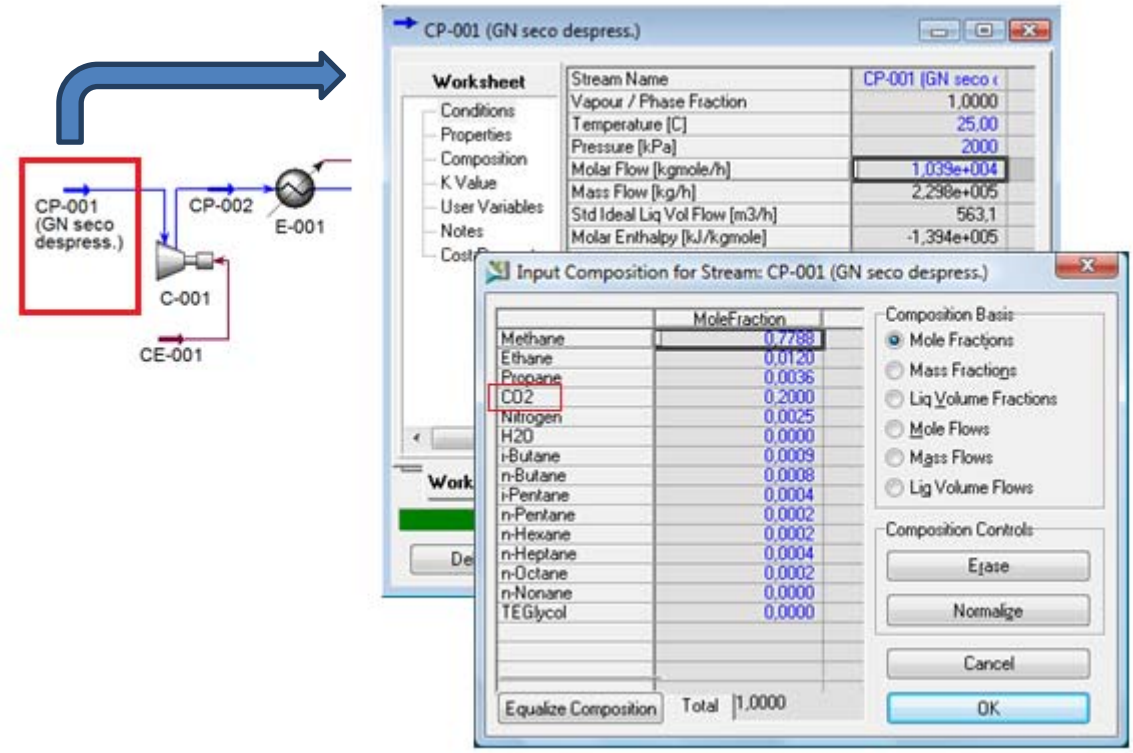


Figura 27. Objeto e Propriedade Referente à Variável MC Direta "Fração Molar CO_2" na Simulação HYSYS.

Já para as variáveis do tipo MC Indiretas, que não variam aleatoriamente e obedecem a uma distribuição normal, a estrutura de nós é mais simplificada que a estrutura de nós das variáveis do tipo MC Diretas. Elas contêm somente as informações diretas da variável, as condições de mínimo e máximo para o atributo e os parâmetros da distribuição. As informações do atributo, assim como as informações do objeto, referentes à simulação do HYSYS, são irrelevantes. A Figura 28 mostra a estrutura de nós para as variáveis de MC Indiretas.

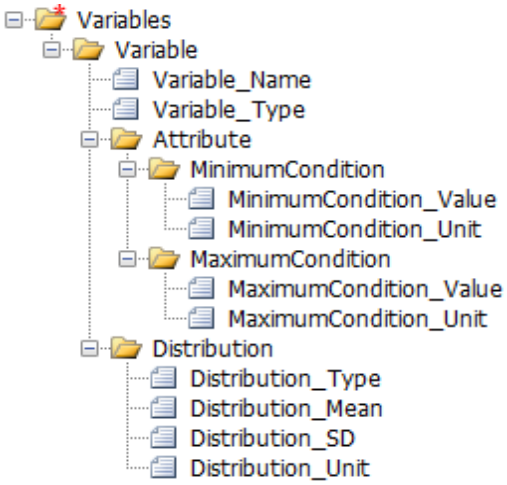


Figura 28. Estrutura de Nós de Variáveis do Tipo MC Indiretas no XML de Configuração.

A estrutura de nós das variáveis do tipo MC indiretas não será detalhada, uma vez que todos os seus nós estão presentes na estrutura das variáveis do tipo MC diretas, que já foi descrita acima. A Figura 44 ilustra o conteúdo da variável do tipo MC indireta referente à vazão do gás natural de entrada no arquivo XML de configuração.

```
<Variable>
    <Variable_Name>Vazao GN</Variable_Name>
    <Variable_Type>Monte_Carlo_Indirect</Variable_Type>
    <Attribute>
        <MinimumCondition>
            <MinimumCondition_Value>3</MinimumCondition_Value>
            <MinimumCondition_Unit>MMsm3/d</MinimumCondition_Unit>
        </MinimumCondition>
        <MaximumCondition>
            <MaximumCondition_Value>9</MaximumCondition_Value>
            <MaximumCondition_Unit>MMsm3/d</MaximumCondition_Unit>
        </MaximumCondition>
    </Attribute>
    <Distribution>
        <Distribution_Type>Normal</Distribution_Type>
        <Distribution_Mean>6</Distribution_Mean>
        <Distribution_SD>1</Distribution_SD>
        <Distribution_Unit>MMsm3/d</Distribution_Unit>
    </Distribution>
</Variable>
```

Figura 29. Variável Vazão GN (MC Indireta) no XML de Configuração.

A estrutura de nós para as variáveis do tipo Expressão está ilustrada na Figura 30.

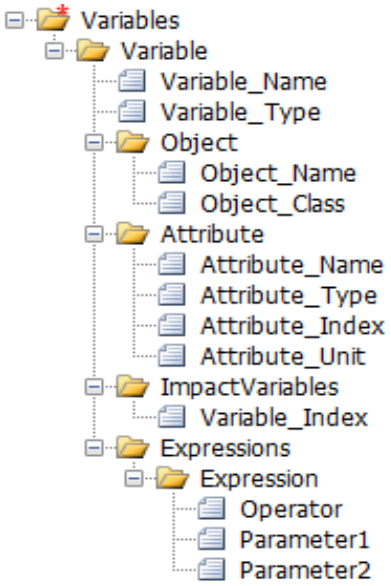


Figura 30. Estrutura de Nós de Variáveis do Tipo Expressão no XML de Configuração.

O primeiro nó referente à variável, ***Variable***, engloba os seguintes nós elementos:

- ***Variable_Name*****:** Mesmo conceito exposto nas variáveis do tipo MC diretas;
- ***Variable_Type*****:** Mesmo conceito exposto nas variáveis do tipo MC diretas;
- ***Object***: Mesmo conceito exposto nas variáveis do tipo MC diretas;
- ***Attribute*****:** Mesmo conceito exposto nas variáveis do tipo MC diretas, com exceção de não conter os nós referentes às condições de mínimo e máximo
- ***ImpactVariables***: Coleção de propriedades presentes no XML que impactam o valor da variável em questão. Podem ser definidas N variáveis de impacto.
    - ***Variable_Index***: Neste nó é informada a posição da variável de impacto no XML, lembrando que as coleções começam a partir da posição zero.
- ***Expressions***: Coleção de expressões para cálculo do valor final da variável do tipo Expressão a ser escrito na simulação no HYSYS. Podem ser definidas N expressões. Cada expressão possui um operador e dois parâmetros, conforme descrito abaixo:
    - ***Operator***: Operador a ser realizado entre o Parameter1 e o Parameter2, nesta ordem. A ferramenta está programada somente para as operações básicas: soma, subtração, multiplicação e divisão. Caso alguma variável apresente necessidade de mais alguma operação, esta deverá ser prevista no código fonte do aplicativo e o local para este tipo de inclusão está indicado nos comentários;
    - ***Parameter1***: Primeiro parâmetro da expressão, que pode ser uma constante, uma variável de impacto ou o resultado de outra expressão anterior, nunca posterior. O motivo desta última ponderação será visto no item 4.1.3.
    - ***Parameter2***: Segundo parâmetro da expressão que pode ser uma constante, uma variável de impacto ou o resultado de outra expressão anterior, nunca posterior.

O conteúdo da variável do tipo Expressão referente à vazão do gás natural de entrada no arquivo XML de configuração, com destaque para os nós de variáveis de impacto e expressões, está detalhado na Figura 31.

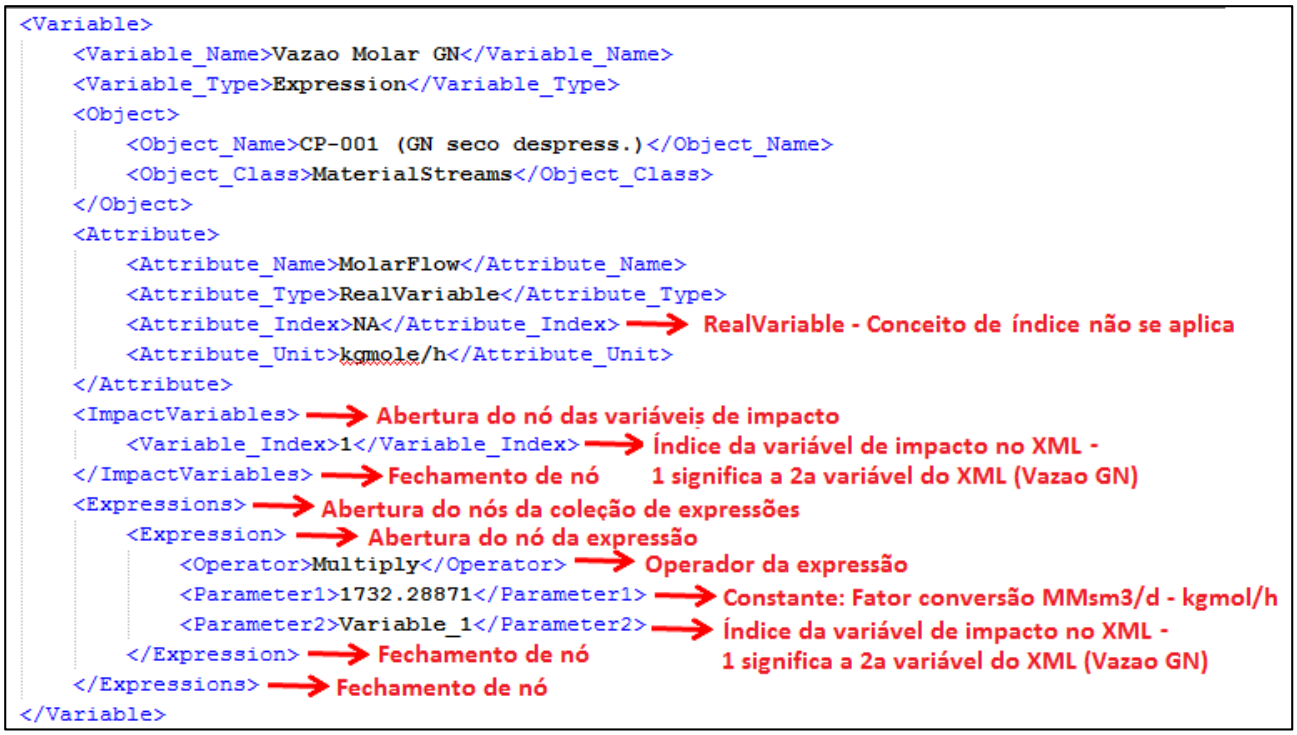


Figura 31. Variável Vazão Molar GN (Expressão) no XML de Configuração.

Como a lógica do cálculo de expressões considera valores constantes, valores de variáveis e valores de outras expressões, é válido detalhar o nó de expressões na variável do tipo Expressão referente à composição de metano (C1) do gás natural de entrada. Seu conteúdo no arquivo XML de configuração está ilustrado na Figura 32.

```
<Variable>
    <Variable_Name>Fracao Molar C1</Variable_Name>
    <Variable_Type>Expression</Variable_Type>
    <Object>
        <Object_Name>CP-001 (GN seco despress.)</Object_Name>
        <Object_Class>MaterialStreams</Object_Class>
    </Object>
    <Attribute>
        <Attribute_Name>ComponentMolarFraction</Attribute_Name>
        <Attribute_Type>RealFlexVariable</Attribute_Type>
        <Attribute_Index>0</Attribute_Index>
        <Attribute_Unit>NA</Attribute_Unit>
    </Attribute>
    <ImpactVariables>
        <Variable_Index>0</Variable_Index>
    </ImpactVariables>
    <Expressions>
        <Expression>
            <Operator>Deduct</Operator>
            <Parameter1>1</Parameter1>
            <Parameter2>Variable_0</Parameter2>
        </Expression>
        <Expression>
            <Operator>Multiply</Operator>
            <Parameter1>0.973528472</Parameter1>
            <Parameter2>Expression_0</Parameter2>
        </Expression>
    </Expressions>
</Variable>
```

Atributo adimensional

Expressão 1 : descontar fração molar CO2

Índice da variável de impacto no XML - 0 significa 1a variável do XML (Fracao Molar CO2)

Expressão 2: ponderar C1 em relação aos demais componentes

Constante ponderação: %C1/(1-%CO2)

Resultado da 1a expressão (índice 0)

Figura 32. Variável Fração Molar de C1 (Expressão) no XML de Configuração.

O arquivo XML de parâmetros de configuração completo encontra-se no Anexo 8.2.

4.1.1.2. Leitura do Arquivo XML

Para leitura de arquivos XML através de uma ferramenta desenvolvida em VB .NET, é necessário definir o modo de leitura deste arquivo. Foi escolhida a classe **XMLDocument** para tal leitura, uma vez que a mesma possui propriedades e métodos que permitem a leitura deste tipo de arquivo com a mesma lógica da orientação a objetos. Esta é uma classe que precisa ser importada para a ferramenta, para que suas propriedades e métodos possam ser lidos diretamente, sem precisar fazer referência à classe a cada comando em que suas propriedades e métodos são utilizados.

A classe referente ao HYSYS também precisa ser importada pelo mesmo motivo e, neste caso, é importante ressaltar que a classe é importada de acordo com a versão de biblioteca de objetos utilizada pela versão do software HYSYS que se encontra instalado na máquina em que a ferramenta está sendo desenvolvida. Para esta Dissertação foi

utilizado a versão HYSYS 2006 (20.0.0.6728), como definido no item 3.1.5. Caso a ferramenta seja utilizada em máquina com versão distinta do HYSYS, algumas classes podem diferir e ajustes no código fonte da ferramenta podem ser necessários. A Figura 33 mostra a importação das classes na ferramenta, sendo a mesma realizada antes do início da classe do módulo.

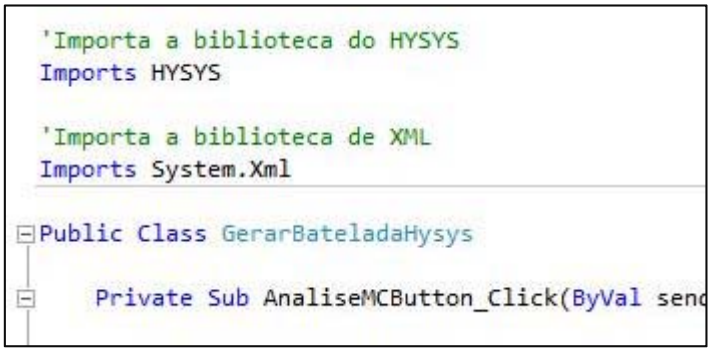


Figura 33. Importação de Classes para a Ferramenta.

O arquivo XML estruturados em nós em forma de árvore de objetos foi lido pela rotina “LerXMLConfig”. Como cada tipo de variável tem estrutura de nós distinta por possuir objetivos distintos, uma das primeiras etapas é diferenciar o tipo de variável que está sendo processada.

Para o caso de variáveis do tipo MC diretas e indiretas, uma rotina para gerar números aleatórios e armazenar seus valores na matriz de MC é chamada. Esta rotina está detalhada no item 4.1.2. Já para as variáveis do tipo Expressões uma rotina para calcular o valor final dessas variáveis e armazenas os valores na matriz de MC é chamada, sendo essa rotina detalhada no item 4.1.3.

4.1.2. Geração de Números Aleatórios e Geração de Distribuições Normais

Para cada variável, os parâmetros da distribuição normal foram lidos e números aleatórios foram gerados conforme a quantidade de rodadas definida na tela de interface. A classe **numRandom** do VB foi utilizada para geração dos valores aleatórios e as Equações de ABRAMOWITZ e STEGUN (1965), Eqs. (9) a (13) foram usadas para transformação dos valores aleatórios em distribuição normal pradronizada. A distribuição em seguida foi despadronizada com base na Eq. (14).

Os valores aleatórios e transformados em distribuição normal são armazenados sob a forma de vetores, sendo o vetor que contém a distribuição normal utilizado para escrita da Matriz de MC. A Figura 34 ilustra o algoritmo referente a este item.

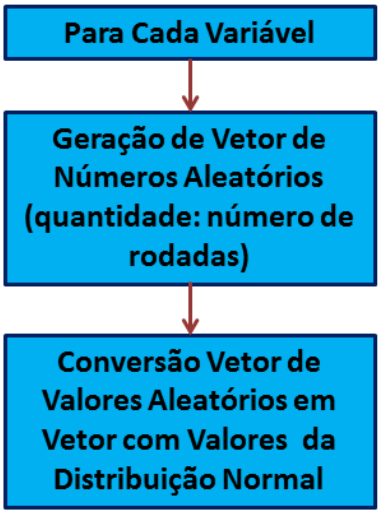


Figura 34. Algoritmo de Cálculo de Valores Aleatórios e Geração de Distribuições Normais.

4.1.3. Cálculo das Expressões

Para cálculo das expressões, a primeira etapa é a leitura das variáveis de impacto. Em seguida são lidos os parâmetros das expressões. Para o caso de um parâmetro numérico, este é transformado em um vetor numérico com a dimensão da quantidade de rodadas. Se o parâmetro for uma variável, a matriz de MC é lida na posição referente à variável de impacto e seus valores são armazenados sob a forma de vetor. Por fim, se o parâmetro for uma expressão, a matriz de expressões, a ser descrita a seguir, é lida na posição referente à expressão de impacto e seus valores são armazenados sob a forma de vetor.
Em uma próxima etapa, comum a todas as variáveis, o tipo de operador é lido e a expressão é então calculada considerando a operação entre o primeiro e o segundo parâmetro, sendo gerada uma matriz de operações (rodadas x expressões) para armazenar os vetores. Essa matriz é gerada com o objetivo de armazenar o resultado das expressões, uma vez que resultados de expressões anteriores podem ser parâmetros de expressões seguintes. Por este motivo, dado que os valores precisar estar armazenados sob a forma de variável, expressões dependentes devem estar sempre escalonadas em ordem de predecessão.

Os valores armazenados na matriz de resultado das expressões já são valores de distribuições normais, uma vez as variáveis do tipo expressão são dependentes de

variáveis MC, que apresentam essa distribuição. Dessa maneira, o vetor correspondente ao resultado final desta matriz, que é o resultado da variável a ser escrito no HYSYS, é utilizado para a escrita da matriz de MC. Este processo é esquematizado pelo algoritmo ilustrado na Figura 35.

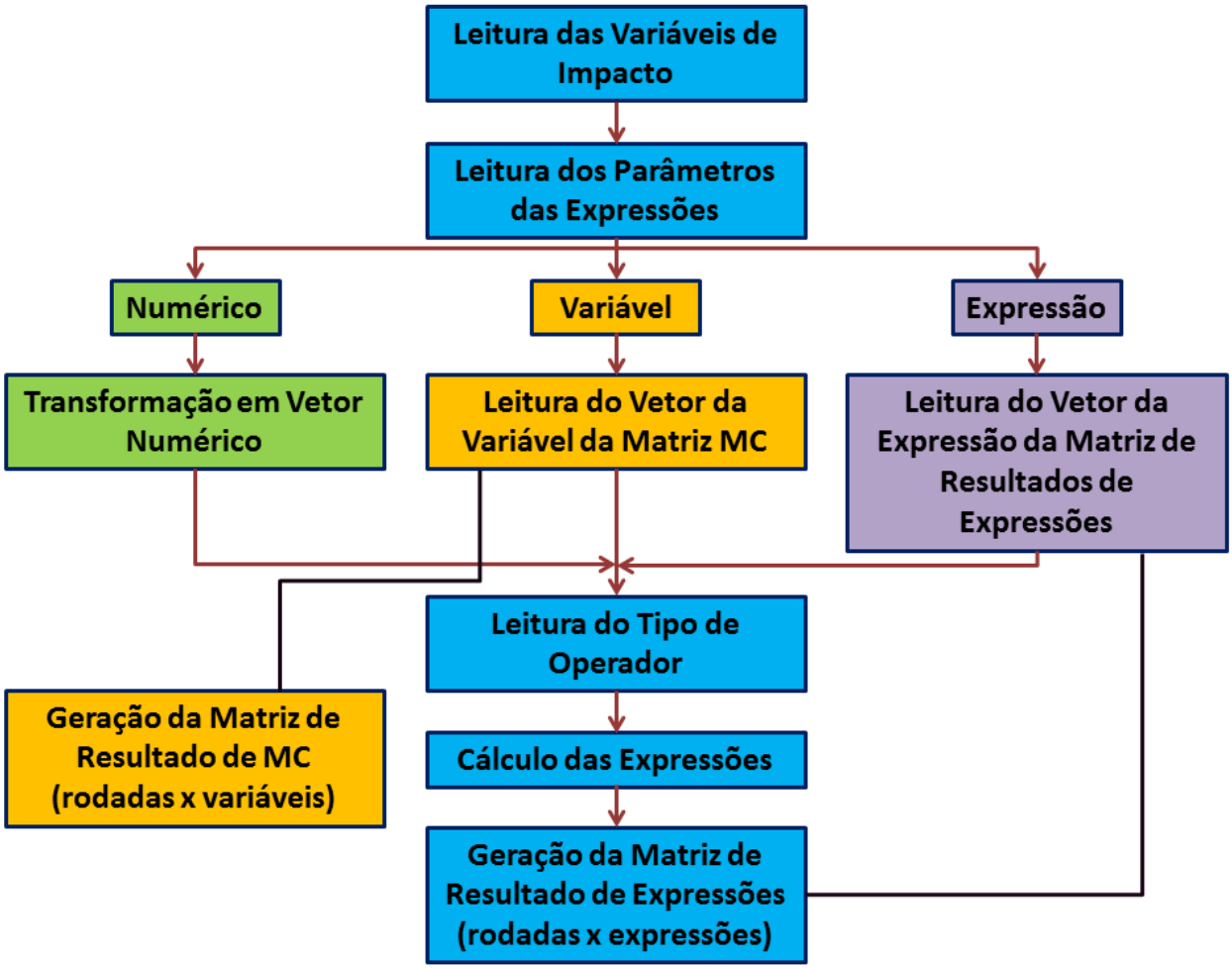


Figura 35. Algoritmo de Cálculo das Expressões.

4.1.4. Geração da Matriz de MC, Arquivo XML com Distribuição Normal, PDFs e Histogramas das Variáveis de Entrada

Como visto nos itens 4.1.2 e 4.1.3, as variáveis de entrada geram vetores com a dimensão da quantidade de rodadas com os valores da distribuição normal para geração da matriz de MC. Esta matriz é escrita a cada variável para armazenar os resultados, no entanto, é escrita na forma de rodada x variável, de forma a facilitar a escrita de dados no HYSYS, como esquematizado na Figura 36.

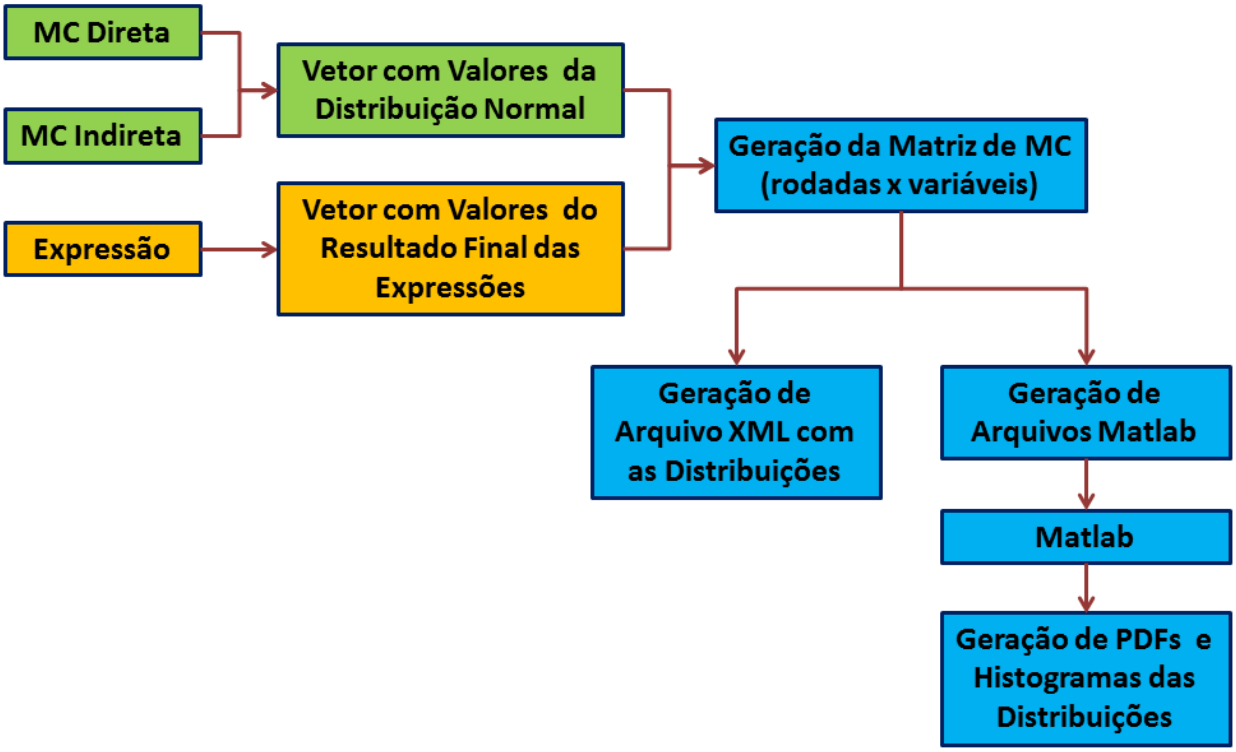


Figura 36. Algoritmo da Geração da Matriz de MC, Arquivo de XML contendo as Distribuições Normais e Arquivos Matlab para Geração de PDFs e Histogramas das Variáveis de Entrada.

A partir dos dados das distribuições normais de cada variável de entrada armazenados na matriz de MC é gerado um arquivo XML contendo essas distribuições. A Figura 37 mostra a estrutura de nós deste arquivo.

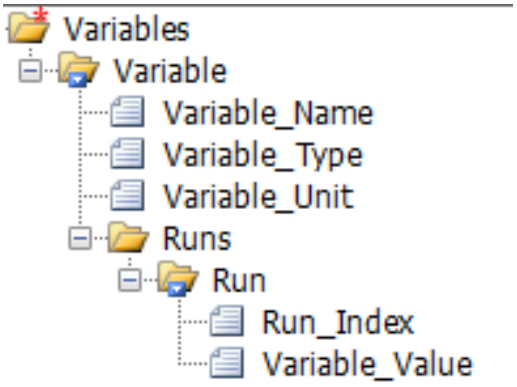


Figura 37. Estrutura de Nós do Arquivo XML com Distribuições de Dados de Entrada.

A estrutura de nós deste arquivo XML é bem simples, conforme descrição de seus nós abaixo:

***Variables*:** Coleção contendo os nós referentes a todas as variáveis de entrada:

- ***Variable:*** Coleção de propriedades da variável:

- ***Variable_Name*:** Nome da variável;
- ***Variable_Type*:** Tipo da variável;
- ***Variable_Unit*:** Unidade da variável;

- ***Runs:*** Coleção contendo todas as rodadas:
  - ***Run:*** Coleção de propriedades da rodada:
    - ***Run_Index***: Índice da rodada;
    - ***Variable_Value***: Valor da variável atribuído à rodada.

O padrão deste XML está ilustrado na Figura 38.

```
<?xml version = '1.0'?>
<Variables>
    <Variable>
        <Variable_Name>Fracao Molar CO2</Variable_Name>
        <Variable_Type>Monte_Carlo_Direct</Variable_Type>
        <Variable_Unit>NA</Variable_Unit>
        <Runs>
            <Run>
                <Run_Index>1</Run_Index>
                <Variable_Value>0,206012066990825</Variable_Value>
            </Run>
            <Run>
                <Run_Index>2</Run_Index>
                <Variable_Value>0,190543525524936</Variable_Value>
            </Run>
            <Run>
                <Run_Index>3</Run_Index>
                <Variable_Value>0,177850496745053</Variable_Value>
            </Run>
            <Run>
                <Run_Index>4</Run_Index>
                <Variable_Value>0,217824643106556</Variable_Value>
            </Run>
```

Figura 38. Arquivo XML com Distribuições de Dados de Entrada.

Também com base nos dados armazenados na matriz de MC, são gerados arquivos em formato MATLAB, que utilizam essa informação para plotar as curvas PDF e CDF e os histrogramas – simples e cumulativo – de barras de cada variável independente de entrada em forma de gráfico. O software MATLAB foi escolhido por ter como um de seus pontos fortes justamente a tratativa de dados para geração de gráficos. Arquivos neste formato são gerados de forma padrão pela ferramenta para cada variável e se faz necessário abrir a interface do MATLAB e rodar cada um dos arquivos para visualizar os gráficos. Para esta Dissertação, o volume de arquivos em formato MATLAB a serem executados não justificou o desenvolvimento de uma rotina da ferramenta "***MCAnalysis***" para automatizar o processo de geração dos gráficos, no entanto, este pode ser

considerado um desenvolvimento futuro. Para tal desenvolvimento, é necessário estudar também a API do MATLAB. O arquivo em formato MATLAB gerado por "***MCAnalysis"*** para geração das curvas PDF e CDF e histogramas de barras – simples e cumulativo – da variável independente vazão do gás natural do processo, advindo do separador trifásico da plataforma se encontra no Anexo 8.3.

4.1.5. Múltiplas Simulações: Escrita de Dados no HYSYS, Leitura do XML da Biblioteca de Leitura e Geração de Arquivo XML de Saída

Esta etapa, aplicável somente para as variáveis do tipo MC direta ou Expressão, pode ser considerada como o segundo grande bloco do módulo de geração de dados em batelada no software HYSYS. A cada rodada, os dados armazenados na matriz de MC são preenchidos no HYSYS e, após convergência, o resultado de múltiplas simulações é gerado. Dessa maneira, esta é a etapa que efetivamente realiza a geração de dados em batelada, utilizando o software HYSYS como solver.

Em um primeiro *loop* (também denominado laço), para cada rodada, a simulação do software HYSYS é colocada em modo de *Solver Holding*, para possibilitar a escrita de todas as variáveis de interesse, evitando assim que a simulação comece a rodar com a escrita de cada variável, o que traria uma performance negativa para a ferramenta.

No segundo *loop*, para cada do tipo MC Direta ou Expressão, é realizada a identificação do objeto correspondente na simulação do HYSYS e também a identificação do tipo de propriedade, *RealVariable* ou *RealFlexVariable*, pois o preenchimento desse tipo de atributo no HYSYS é realizado de maneira distinta, e o valor da propriedade é então finalmente preenchido no HYSYS.

Após a finalização do segundo *loop*, o valor de todas as variáveis de interesse é preenchido na simulação. Dessa forma, a simulação pode ser colocada em modo Solver Active para que ela efetivamente comece a convergir. Após convergência da simulação, um arquivo XML contém uma biblioteca de parâmetros da simulação que devem ser lidos e escritos em um arquivo de XML de saída. Quando a escrita do arquivo de XML de saída é finalizada, o primeiro *loop* é concluído a rotina volta a ser executada para uma nova rodada. A Figura 39 esquematiza o processo descrito acima.

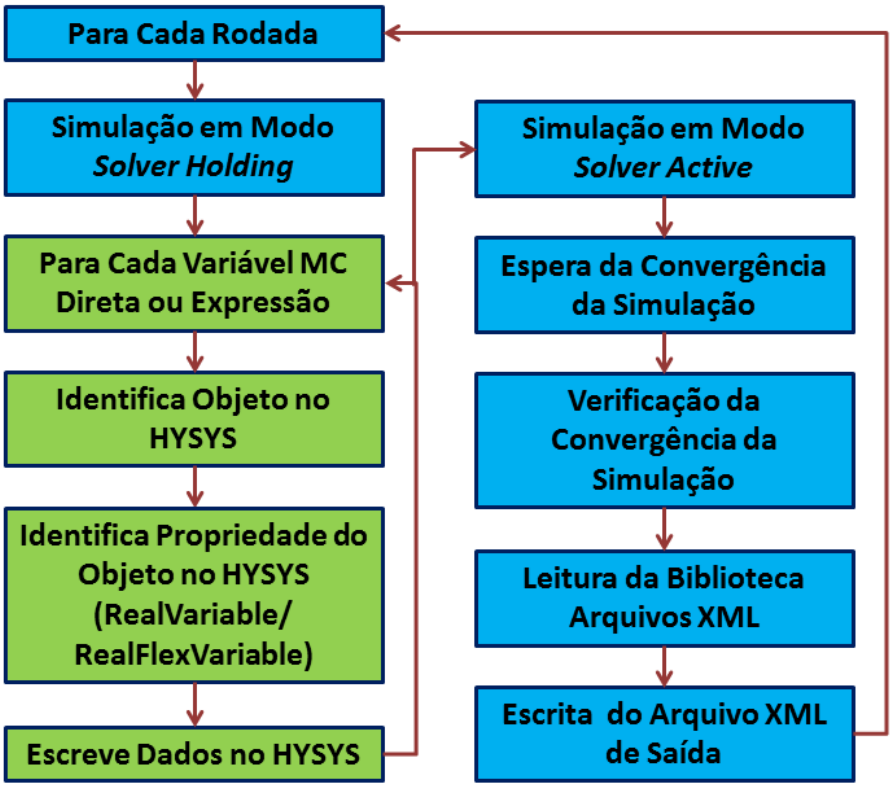


Figura 39. Algoritmo de Escrita de Dados no HYSYS, Leitura do Arquivo XML da Biblioteca de Leitura e Escrita do Arquivo XML de Saída.

4.1.5.1. Arquivo XML da Biblioteca de Leitura

Também com base na premissa de desenvolvimento de uma ferramenta genérica para utilização em diversas simulações, foi criada uma biblioteca de leitura de dados através de um arquivo XML. Um nó é criado para cada classe de objetos da simulação de modo a conter as propriedades de cada classe que se deseja ler. No presente trabalho foram criados arquivos para as classes necessárias à análise MMC do projeto definido no Caso Base. Como melhoria futura, esta biblioteca de arquivos deve ser expandida de modo a ser capaz de ler a maior quantidade de classes e propriedades relevantes possíveis, de modo a minimizar trabalhos de mapeamento de classes e propriedades relevantes ao se utilizar o aplicativo. A biblioteca foi desenvolvida para três classes:

- Correntes de processo;
- Componente de correntes de processo;
- Correntes de energia.

O mapeamento para essas três classes se encontra bem completo. No entanto, para otimizar o tempo de execução da ferramenta, foi criado um novo arquivo XML de

biblioteca de leitura contendo somente as propriedades relevantes à análise MMC dessa simulação, denominado de biblioteca simplificada. Dessa maneira é interessante ter um arquivo completo de mapeamento a ser consultado no início de qualquer análise MMC para depois simplificar e gerar um arquivo menor contendo somente as propriedades de interesse. Esta observação é importante especialmente no caso da classe de componentes de correntes de processo, em que as propriedades são do tipo RealFlexVarible, armazenadas sob a forma de vetores, quanto mais componentes presentes na simulação, ainda maior é a quantidade de dados a serem lidos da simulação a serem considerados, aumentando bastante o esforço computacional.

Assim como o desenvolvimento do arquivo XML de parâmetros de configuração, a criação desta biblioteca tem como objetivo evitar alterações no código do aplicativo para atender a especificidades de simulações, generalizando ainda mais a ferramenta. A estrutura de nós deste arquivo XML é única para todas as classes e está ilustrada na Figura 40.

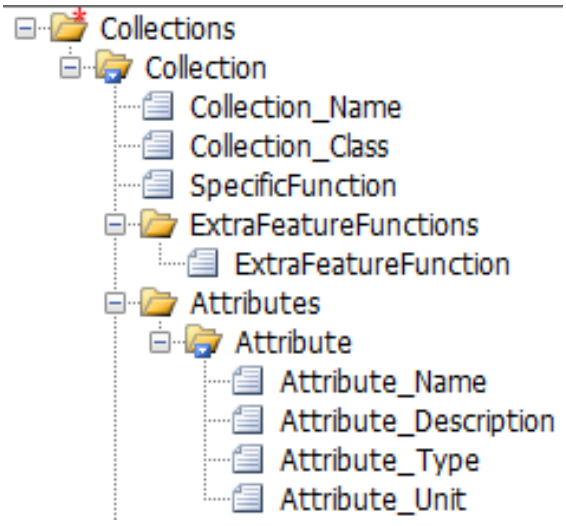


Figura 40. Estrutura de Nós do Arquivo XML da Biblioteca de Leitura de Dados.

A estrutura de nós deste arquivo XML é bem simples, conforme descrição de seus nós abaixo:

***Collections*:** Coleção contendo os nós referentes a todas as classes, denominadas coleções no XML. Esta denominação foi proposta por as classes representarem coleções de objetos da simulação:

- ***Collection:*** Coleção de propriedades da coleção:
    - ***Collection_Name*:** Nome da coleção;

- ***Collection _Class*:** Classe da coleção, conforme definido na classe da biblioteca do HYSYS;
- ***SpecificFunction:*** Função específica de leitura para os casos em que não é possível ler os parâmetros de tal coleção na simulação através da rotina geral de leitura. O nome desta função deve ser escrito neste nó conforme definido no código fonte da ferramenta. Caso novas coleções mapeadas no futuro necessitem de funções especificas, as mesmas devem ser inclusas no código fonte da ferramenta e o local para este tipo de inclusão está indicado nos comentários. Uma coleção só pode ter uma função específica de leitura;
- ***ExtraFeatureFunctions:*** Coleção de funções características extra. Caso não seja possível extrair algum resultado de interesse da simulação através da leitura direta de atributos de objetos e alguma manipulação de dados precise ser realizada, uma função característica extra deve ser então criada. Uma coleção pode ter N funções deste tipo. Caso novas coleções mapeadas no futuro necessitem desse tipo de funções, as mesmas devem ser inclusas no código fonte da ferramenta e o local para este tipo de inclusão está indicado nos comentários:
  - ***ExtraFeatureFunction:*** Nome da função característica extra, conforme definido no código fonte da ferramenta;
  - ***Attributes:*** Coleção de atributos a serem lidos para objetos dessa coleção:
    - ***Attribute:*** Coleção de propriedades do atributo:
      - ***Attribute_Name:*** Nome do atributo, conforme definido na classe da biblioteca do HYSYS;
      - ***Attribute_Description:*** Descrição do atributo, conforme definido na classe da biblioteca do HYSYS;
      - ***Attribute_Type:*** Tipo do atributo, conforme definido na classe da biblioteca do HYSYS;
      - ***Attribute_Unit*:** Unidade do atributo, conforme definido na classe da biblioteca do HYSYS. O valor do atributo será lido da simulação com esta unidade.

A Figura 41 mostra o padrão deste XML em sua versão simplificada, contendo as três coleções mapeadas.

Figura 41. Arquivo XML Simplificado da Biblioteca de Leitura de Dados.

No caso das correntes de processo, como o ponto de orvalho da água e de hidrocarbonetos da corrente final de gás natural não são propriedades lidas diretamente de atributos do objeto corrente, foi necessário desenvolver duas funções características extras: “CalcularWDP” e “CalcularHCDP”.

Para o caso do cálculo do ponto de orvalho (fração de vapor = 1) em determinada pressão, a API do HYSYS possui a classe **PVFlash**, para cálculo de flash. A rotina “CalcularDP”, utilizada pelas funções características acima se encontra exemplificada na Figura 42. Esta rotina poderia ser ainda mais genérica e incluir o cálculo do ponto de bolha (fração de vapor = 0), pois lógica para este cálculo é exatamente a mesma. A mesma também pode ser utilizada dentro de correntes de qualquer simulação, para verificar pontos de orvalho e bolha, através da opção “*UserVariables*”. Neste caso é importante ressaltar que o comando que verifica se o flash convergiu na linguagem VB .NET difere do comando da linguagem VBS, que é linguagem utilizada na opção “*UserVariables*”.

```
'Rotina para calcular ponto de orvalho
'Dá para otimizar para ponto de bolha atribuindo variável extra para a fração molar
Sub CalcularDP(ByVal objHysys, ByVal OutputXMLFileWrite, ByVal pDP, ByVal pDPunit, ByVal nameProp, ByVal descProp)

    'Declara Temperatura do Ponto de Orvalho da Água
    Dim tDP As Double

    'Define orrente auxiliar para cálculo do flash
    Dim myfluid As Fluid = objHysys.DuplicateFluid

    'Declara tatus do flash da corrente auxiliar
    Dim fs As FlashStatus_enum

    'Com a corrente auxiliar
    With myfluid

        'Define a pressão do ponto de orvalho
        .Pressure.SetValue(pDP, pDPunit)

        'Calcula o ponto de orvalho
        fs = .PVFlash(.PressureValue, 1)

        'Se o flash convergir
        'Não está reconhecendo fs.FlashOK
        If fs = 0 Then

            'Define a temperatura do ponto de orvalho
            tDP = .TemperatureValue

            'Se não convergiu
        Else

            'Define a temperatura do ponto de orvalho como vazia
            tDP = -32767

        End If

    End With

    'Chama rotina para escrever atributo extra no XML de saída
    Call EscreverAtributoXMLSaida(OutputXMLFileWrite, nameProp, descProp, tDP, "C")

End Sub
```

Figura 42. Rotina “CalcularDP” para Cálculo do Ponto de Orvalho.

O arquivo XML da biblioteca de leitura simplificada encontra-se no Anexo 8.4.

4.1.5.2. Arquivo XML de Saída

O arquivo de XML de saída, que contém todos dados relevantes das múltiplas simulações possui uma estrutura de nós, descrita abaixo, única para todos os dados extraídos, conforme mostra a Figura 43.

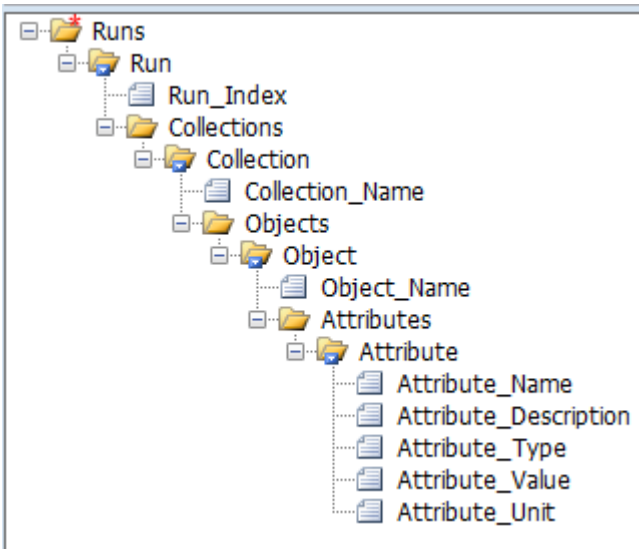


Figura 43. Estrutura de Nós do Arquivo XML de Saída.

***Runs*:** Coleção contendo os nós referentes a todas as rodadas da simulação:

- ***Run:*** Coleção de propriedades da rodada:
  - ***Run _Index*:** Índice da rodada;
  - ***Collections*:** Coleção contendo os nós referentes a todas as coleções;
    - ***Collection:*** Coleção de propriedades da coleção:
      - ***Collection_Name*:** Nome da coleção;
      - ***Objects:*** Coleção contendo os nós referentes a todos os objetos;
        - ***Object:*** Coleção de propriedades do objeto:
          - ***Object_Name*:** Nome do objeto;
          - ***Attributes:*** Coleção contendo os nós referentes a todos os atraibutos:
            - ***Attribute:*** Coleção de propriedades do atributo:
              - ***Attribute_Name*:** Nome do atributo;
              - ***Attribute_Description*:** Descrição do atributo;
              - ***Attribute_Type*:** Tipo do atributo;
              - ***Attribute_Value*:** Valor do atributo;
              - ***Attribute_Unit*:** Unidade do atributo.

O padrão deste XML está ilustrado na Figura 44.

Figura 44. Arquivo XML de Saída.

4.1.5.3. Leitura do Arquivo de XML com Biblioteca de Leitura e Escrita do Arquivo XML com Dados de Saída da Simulação

De modo a otimizar a performance de "***MCAnalysis***", assim que os dados são lidos do HYSYS, os mesmos são escritos em sequência no arquivo XML que contém os dados de saída da simulação, não sendo os mesmos armazenados em variável para posterior escrita.

Conforme esquematizado pela Figura 45, o processo de leitura e escrita de dados é composto por cinco *loops*. No primeiro *loop*, a cada rodada a identificação do índice é escrita no arquivo XML de saída e é iniciada a leitura do arquivo XML da biblioteca de leitura. O segundo *loop* é realizado para cada coleção do arquivo de leitura, escrevendo o nome da coleção no arquivo de saída. Já o terceiro *loop* é feito para cada objeto da coleção em questão, em que o nome do objeto advindo da simulação é escrito, enquanto que o quarto *loop* se refere aos atributos do objeto, em que os atributos mapeados no XML de leitura são lidos e escritos no XML de saída. Este quarto *loop* se encerra após a

leitura e escrita de todos os atributos mapeados. Ainda dentro do terceiro *loop*, um quinto *loop* de inicia, referente às funções características extras. Neste *loop* as funções são lidas, os atributos necessários são lidos do objeto, as devidas manipulações são realizadas e o valor de retorno dessa função é escrito no XML de saída no mesmo padrão de um atributo. Após a leitura e escrita de todas as funções, este *loop* se encerra e o terceiro *loop* é retomado para todos os objetos; o segundo, para todas as coleções e o primeiro, para todas as rodadas.

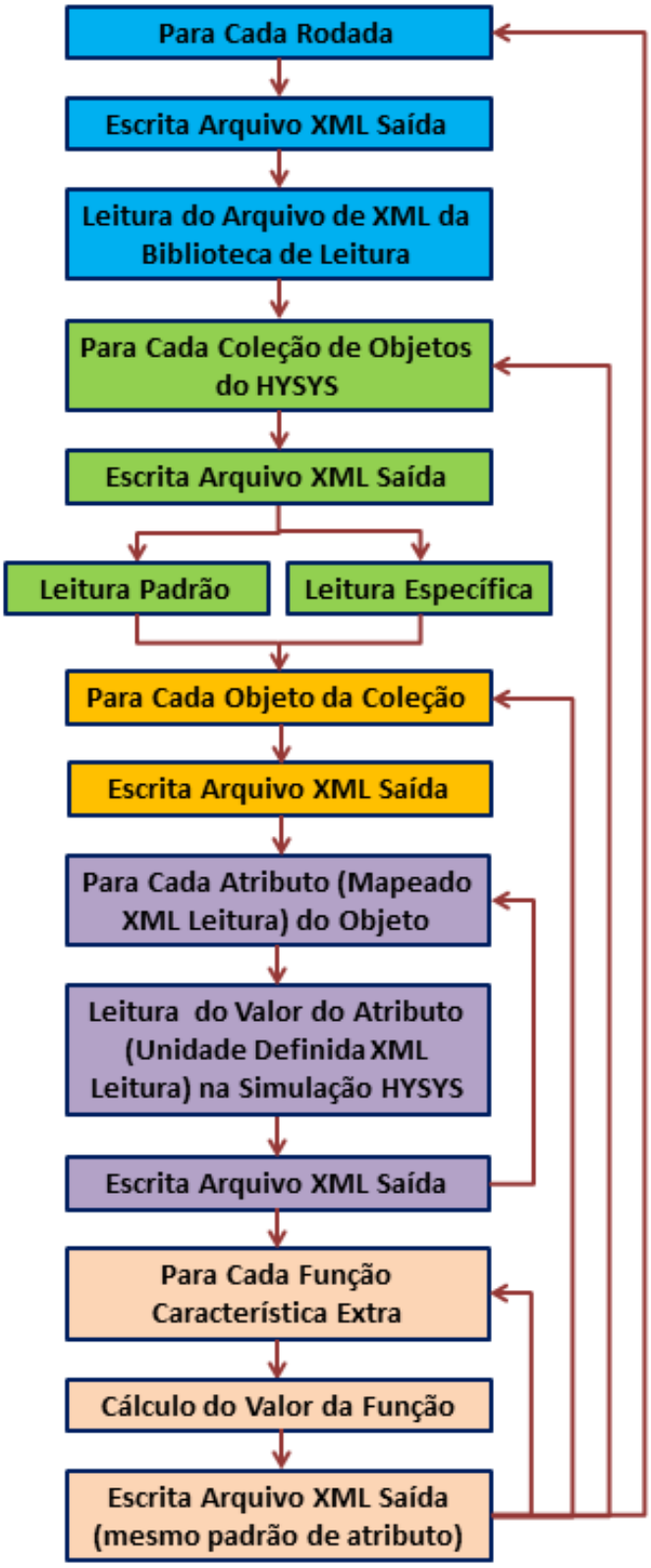


Figura 45. Algoritmo de Escrita de Dados no HYSYS, Leitura do Arquivo XML da Biblioteca de Leitura e Escrita do Arquivo XML de Saída.

.

4.2. Módulo de Análise de Monte Carlo

A interface do segundo módulo da ferramenta "***MCAnalysis"***, denominado "Gerar Análise de Monte Carlo" está ilustrada na Figura 46.

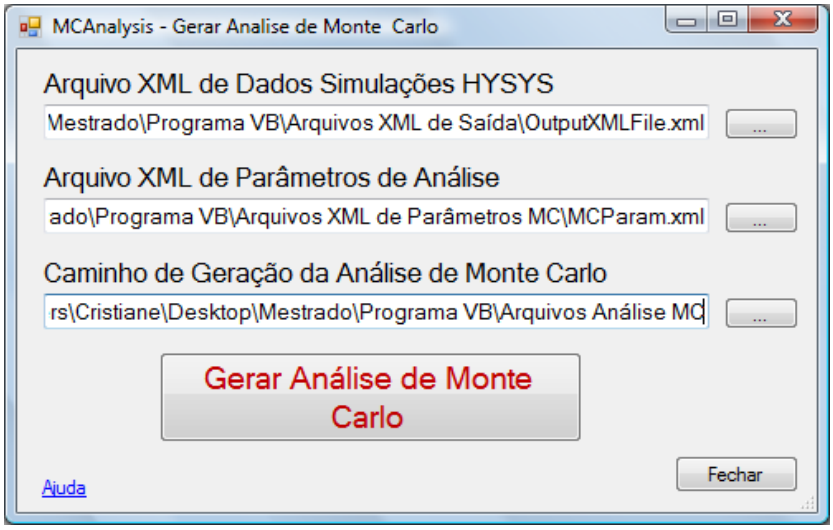


Figura 46. Interface do Módulo de Geração da Análise de Monte Carlo.

Os campos requeridos na Figura 46 ficam mais claros quando se entende o algoritmo geral deste módulo, descrito pela Figura 47.

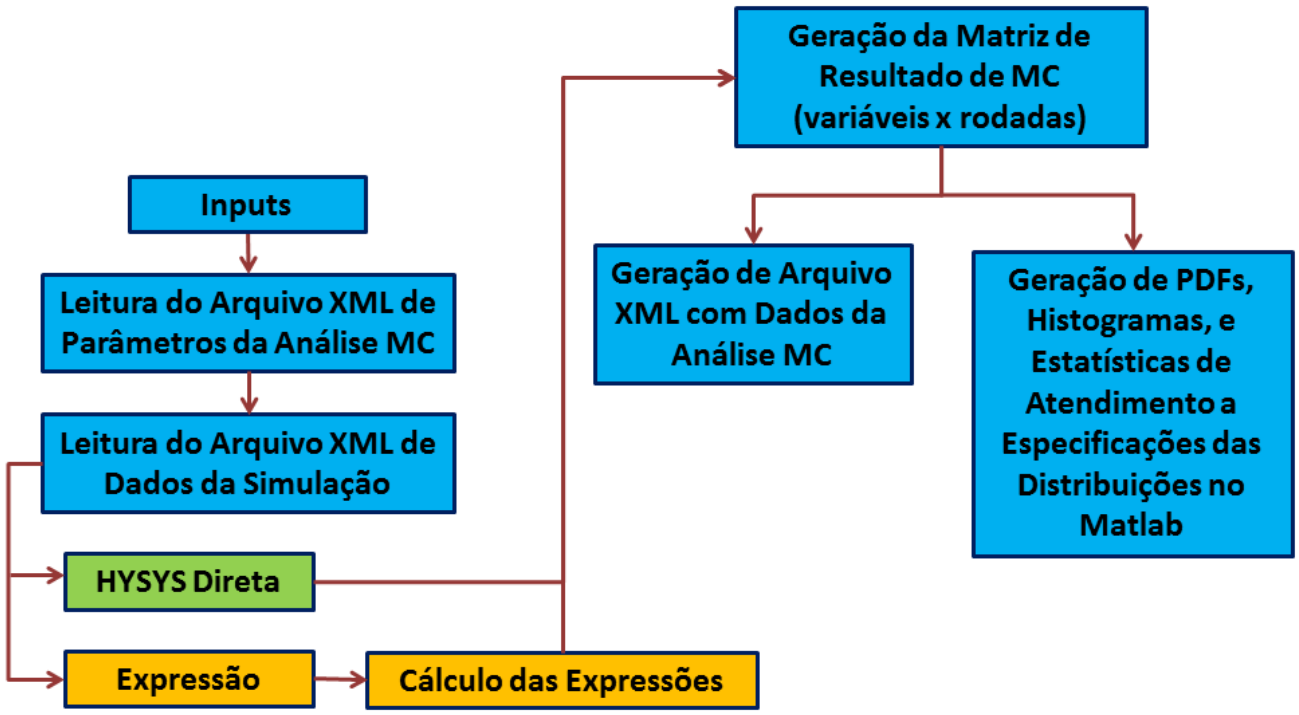


Figura 47. Algoritmo Geral do Módulo de Geração da Análise de Monte Carlo.

Em resumo, este módulo, composto pela classe “GerarAnaliseMC”, é iniciado com o preenchimento das informações disponíveis em sua tela de interface e a seleção do botão “Gerar Análise de Monte Carlo”, evento que dispara a execução da primeira rotina da classe. A Figura 48 ilustra a abertura da classe do módulo e a rotina referente ao evento de seleção do botão.

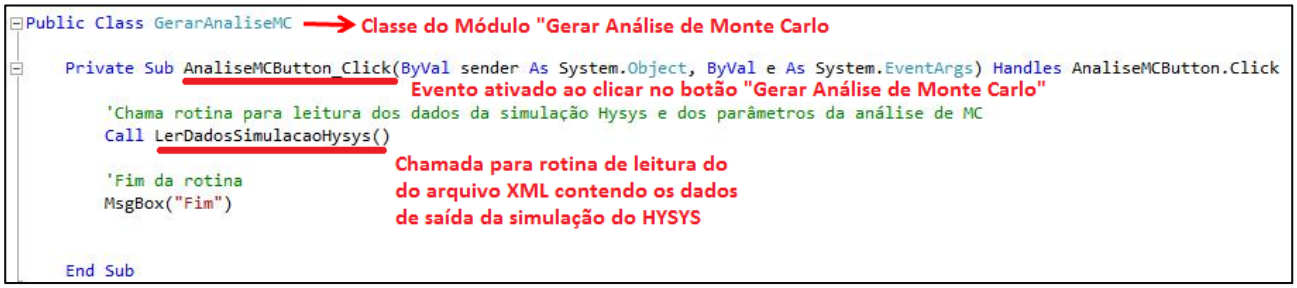


Figura 48. Inicialização da Classe “GerarAnaliseMC”.

A primeira rotina do módulo somente aciona a leitura de um arquivo XML contendo os dados de saída da simulação. A leitura deste arquivo é realizada em conjunto com a leitura de outro arquivo XML, de parâmetros da análise MMC, contendo as variáveis da simulação relevantes à análise MMC, cuja estrutura de nós está detalhada no item 4.2.1. Dessa maneira, apenas os dados de interesse são lidos do arquivo de XML de saída para geração da análise.

Caso a variável de interesse seja uma variável do tipo HYSYS Direta, o que significa que esta pode ser lida diretamente do arquivo XML de saída, seu valor é lido e armazenado na matriz de MC, segundo a mesma lógica apresentada no módulo de geração de dados em batelada. Ainda seguindo esta lógica, se a variável for do tipo Expressão, o que significa que seu resultado é uma expressão envolvendo outras variáveis que podem ser lidas diretamente do arquivo XML de saída, é necessário realizar uma etapa de cálculo de expressões para que então o seu valor seja armazenado na matriz de MC.

Os dados armazenados na matriz de MC são utilizados para geração do arquivo XML contendo os dados da análise de MMC, sendo este descrito no item 4.2.2, e para geração de arquivos em MATLAB, também seguindo a mesma lógica do módulo de geração de dados em batelada. No entanto, o conteúdo dos arquivos MATLAB, além de englobar as curvas PDF, CDF e os histogramas de barras – simples e cumulativos – das distribuições, contém também estatísticas de qual a porcentagem de atendimento a especificações restritivas de cada variável, quando aplicável. Embora as variáveis desta Dissertação

apresentem somente restrições de limite máximo ou de limite mínimo, a análise MMC desenvolvida prevê também restrições de ambos os limites.

4.2.1. Arquivo XML de Parâmetros da Análise de MC

A estrutura de nós do arquivo XML de parâmetros da análise MMC foi desenvolvida com base na estrutura já definida para o arquivo XML de parâmetros de configuração do módulo de geração de dados em batelada, neste item denominado como XML base, com adaptações para atender às necessidades da análise MMC. A Figura 49 ilustra a estrutura de nós deste XML de parâmetros da análise MMC.

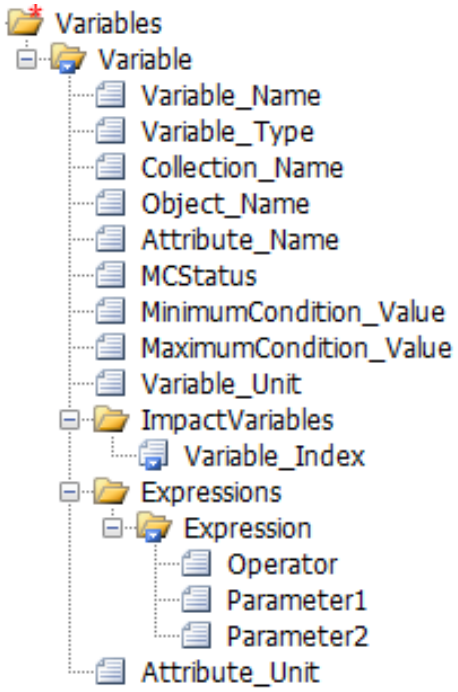


Figura 49. Estrutura de Nós do Arquivo XML de Parâmetros da Análise de MMC.

No entanto, da mesma maneira que o XML base, como este XML possui dois tipos de variáveis, HYSYS direta e Expressão, e a estrutura de nós difere entre elas, é mais prático descrever a estrutura de nós de cada variável em separado. A estrutura das variáveis do tipo HYSYS direta, ilustrada na Figura 50, é composta pelos seguintes nós:

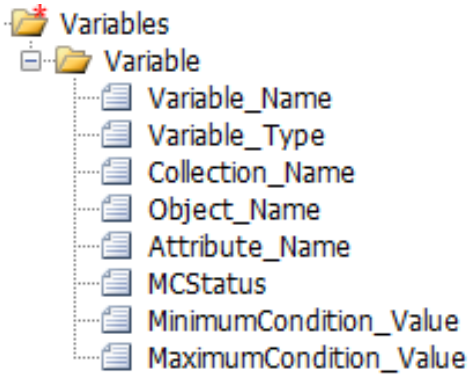


Figura 50. Estrutura de Nós da Variável do Tipo HYSYS Direta no Arquivo XML de Parâmetros da Análise de MMC.

***Variables*:** Coleção contendo os nós referentes a todas as variáveis de interesse para a análise de Monte Carlo:

- ***Variable:*** Coleção de propriedades da variável:
  - ***Variable_Name***: Nome da variável;
  - ***Variable_Type***: Tipo da variável: Hysys Direta ou Expressão;
  - ***Collection_Name***: Nome da coleção;
  - ***Object_Name***: Nome do objeto;
  - ***Attribute_Name:*** Nome do atributo;
  - ***MCStatus***: Status para indicar se a variável é relevante para a análise de Monte Carlo ou se está sendo extraída somente para compor uma variável do tipo Expressão. Há duas opções para preenchimento desse campo: Relevant ou Auxiliar. É importante ressaltar que este nó não estará presente em variáveis do tipo Expressão, visto que se as mesmas estão presentes neste XML, elas são relevantes para a análise;
  - ***MinimumCondition_Value***: Valor mínimo de especificação restritiva;
  - ***MaximumCondition_Value***: Valor máximo de especificação restritiva.

A Figura 51 mostra o padrão da variável do tipo HYSYS direta no arquivo XML.

```
<Variable>
    <Variable_Name>Ponto de Orvalho Agua GN final</Variable_Name>
    <Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
    <Collection_Name>Correntes de Processo</Collection_Name>
    <Object_Name>CP-041 (GN final)</Object_Name>
    <Attribute_Name>WDP</Attribute_Name>
    <MCStatus>Relevant</MCStatus>
    <MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
    <MaximumCondition_Value>-45</MaximumCondition_Value>
</Variable>
```

Figura 51. Variável do Tipo HYSYS Direta no Arquivo XML de Parâmetros da Análise de MMC.

Já a estrutura de nós das variáveis do tipo Expressão, ilustrada na Figura 52, possui nós em comum com as variáveis do tipo HYSYS Direta (*Variables*, *Variable*, *Variable_Name*, *Variable_Type*, *MiminumCondition_Value* e *MaximumCondition_Value*) e com as variáveis do tipo Expressão do XML de parâmetros de configuração do módulo de geração de dados em batelada (*ImpactVariables* e *Expressions*). O único nó específico deste tipo de variável é o de unidade (*Variable_Unit*). Esta informação não está sendo calculada diretamente através das unidades das variáveis de impacto, pois pode ocorrer que a unidade resultante seja uma combinação de duas ou mais unidades distintas, o que acarretaria em especificar demais o código da ferramenta, sendo preferível deixar como informação de entrada através do XML.

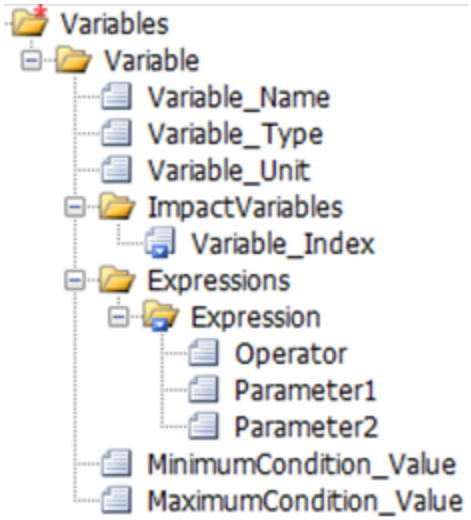


Figura 52. Estrutura de Nós da Variável do Tipo Expressão no Arquivo XML de Parâmetros da Análise de MMC.

A Figura 53 mostra o padrão da variável do tipo HYSYS direta no arquivo XML. Neste exemplo, a potência necessária para comprimir o CO_2 à pressão de reinjeção em EOR requer cinco estágios de compressão, sendo esta potência dada pela soma das potências dos estágios compressores. Os cinco compressores são listados com variáveis do tipo

HYSYS direta com status auxiliar e as expressões listadas na Figura 53 representam a soma descrita acima. O conteúdo completo deste arquivo XML de parâmetros para análise MMC se encontra no Anexo 8.5.

```
<Variable>
    <Variable_Name>Potencia Compressores CO2</Variable_Name>
    <Variable_Type>Expression</Variable_Type>
    <Variable_Unit>kJ/h</Variable_Unit>
    <ImpactVariables>
        <Variable_Index>9</Variable_Index>
        <Variable_Index>10</Variable_Index>
        <Variable_Index>11</Variable_Index>
        <Variable_Index>12</Variable_Index>
        <Variable_Index>13</Variable_Index>
    </ImpactVariables>
    <Expressions>
        <Expression>
            <Operator>Sum</Operator>
            <Parameter1>Variable_0</Parameter1>
            <Parameter2>Variable_1</Parameter2>
        </Expression>
        <Expression>
            <Operator>Sum</Operator>
            <Parameter1>Expression_0</Parameter1>
            <Parameter2>Variable_2</Parameter2>
        </Expression>
        <Expression>
            <Operator>Sum</Operator>
            <Parameter1>Expression_1</Parameter1>
            <Parameter2>Variable_3</Parameter2>
        </Expression>
        <Expression>
            <Operator>Sum</Operator>
            <Parameter1>Expression_2</Parameter1>
            <Parameter2>Variable_4</Parameter2>
        </Expression>
    </Expressions>
    <MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
    <MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
```

Figura 53. Variável do Tipo Expressão no Arquivo XML de Parâmetros da Análise de MMC.

4.2.2. Arquivo XML de Saída da Análise de Monte Carlo

O arquivo de XML de saída, que contém todos dados relevantes das múltiplas simulações possui uma estrutura de nós, descrita abaixo, única para todos os dados extraídos, conforme mostra a Figura 54.

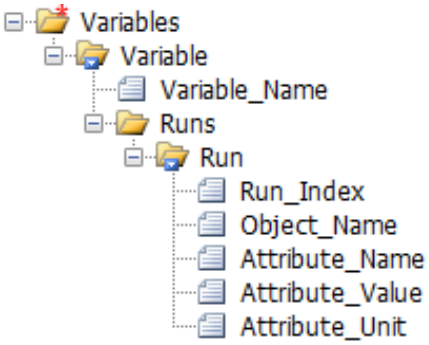


Figura 54. Estrutura de Nós do Arquivo XML de Saída da Análise de Monte Carlo.

***Variables*:** Coleção contendo os nós referentes a todas as variáveis da análise de Monte Carlo:

- ***Variable:*** Coleção de propriedades da variável:
  - ***Variable_Name***: Nome da variável;
  - ***Runs*:** Coleção contendo os nós referentes a todas as rodadas da simulação:
    - ***Run:*** Coleção de propriedades da rodada:
      - ***Run _Index*:** Índice da rodada;
        - ***Object_Name*:** Nome do objeto;
        - ***Attribute_Name*:** Nome do atributo;
        - ***Attribute_Value*:** Valor do atributo;
        - ***Attribute_Unit*:** Unidade do atributo.

O padrão deste XML está ilustrado na Figura 55.

```
<?xml version = '1.0'?>
<Variables>
    <Variable>
        <Variable_Name>Ponto de Orvalho Agua GN final</Variable_Name>
        <Runs>
            <Run>
                <Run_Index>1</Run_Index>
                <Object_Name>CP-041 (GN final)</Object_Name>
                <Attribute_Name>WDP</Attribute_Name>
                <Attribute_Value>-52,1506365972069</Attribute_Value>
                <Attribute_Unit>C</Attribute_Unit>
            </Run>
            <Run>
                <Run_Index>2</Run_Index>
                <Object_Name>CP-041 (GN final)</Object_Name>
                <Attribute_Name>WDP</Attribute_Name>
                <Attribute_Value>-52,3096732174266</Attribute_Value>
                <Attribute_Unit>C</Attribute_Unit>
            </Run>
            <Run>
                <Run_Index>3</Run_Index>
                <Object_Name>CP-041 (GN final)</Object_Name>
                <Attribute_Name>WDP</Attribute_Name>
                <Attribute_Value>-52,3264812455531</Attribute_Value>
                <Attribute_Unit>C</Attribute_Unit>
            </Run>
```


Figura 55. Arquivo XML de Saída da Análise de Monte Carlo.

5. ANÁLISE DE MONTE CARLO E RESULTADOS

O objetivo deste Capítulo é apresentar a metodologia de Monte Carlo para administração de incertezas no dimensionamento de um projeto de processamento *offshore* de gás natural. A análise MMC foi realizada no projeto do Caso Base desenvolvido no Capítulo 3, considerando-se a vazão e a fração molar de CO_2 do gás natural de entrada como variáveis independentes não-determinísticas e utilizando uma população de 1000 sorteios de números randômicos para cada variável.

Além disso, foi adotada a premissa de que o dimensionamento de um projeto é considerado razoável se este atender a pelo menos 75% dos casos da população amostrada no MMC. Utilizando-se o módulo de geração de dados em batelada no HYSYS da ferramenta "***MCAnalysis***", os histogramas de barras – simples e cumulativo – e as curvas PDFs e CDFs foram gerados para as variáveis independentes. Alguns destes histogramas estão ilustrados na Figura 56 para vazão de gás e na Figura 57 para fração molar de CO2. Nos cabeçalhos destas figuras é possível verificar que as populações amostradas atingiram médias e desvios padrões amostrais muito próximos dos valores selecionados para a análise MMC, a saber: (i) vazão de gás natural bruto μ = 6 MMsm^3/d, σ = 1 MMsm^3/d; (ii) fração molar de CO_2 de carga μ = 0.20, σ = 0.03.

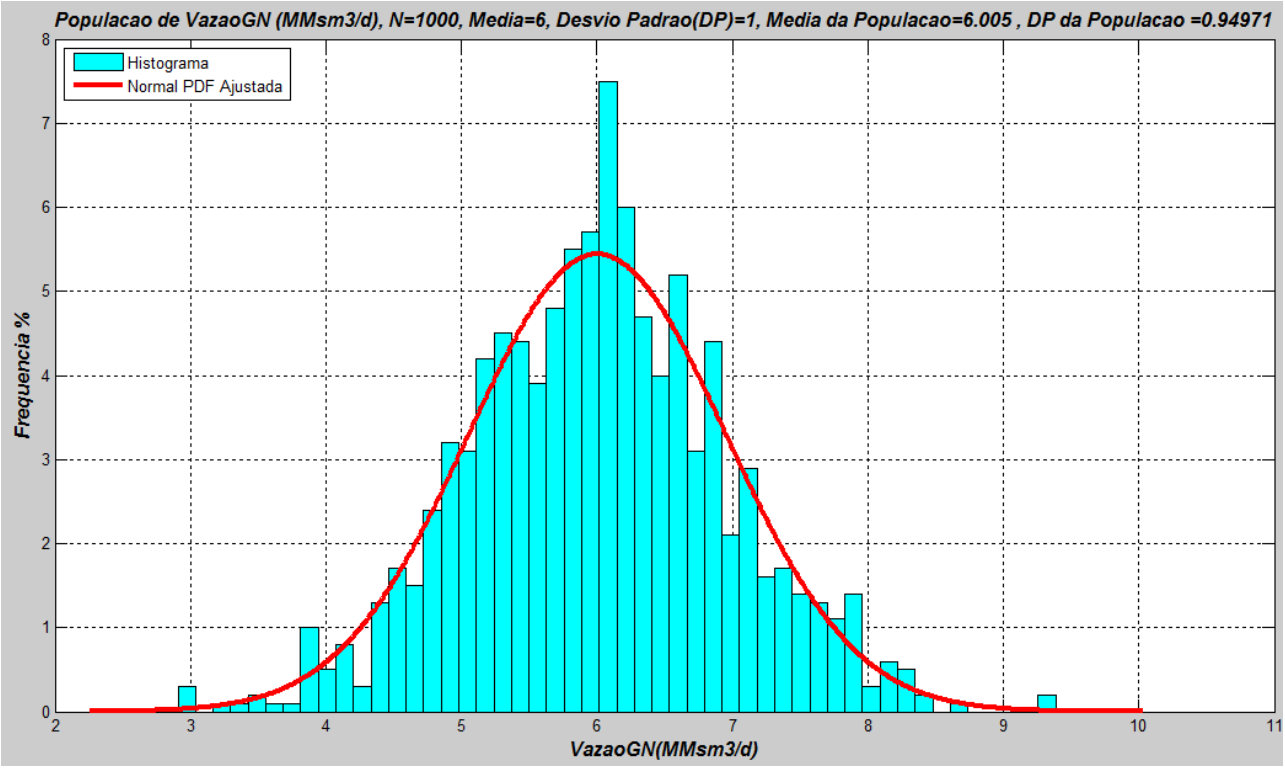


Figura 56. Histograma de Barras e Curva PDF da Vazão (MMsm³/d) do Gás Natural de Entrada.

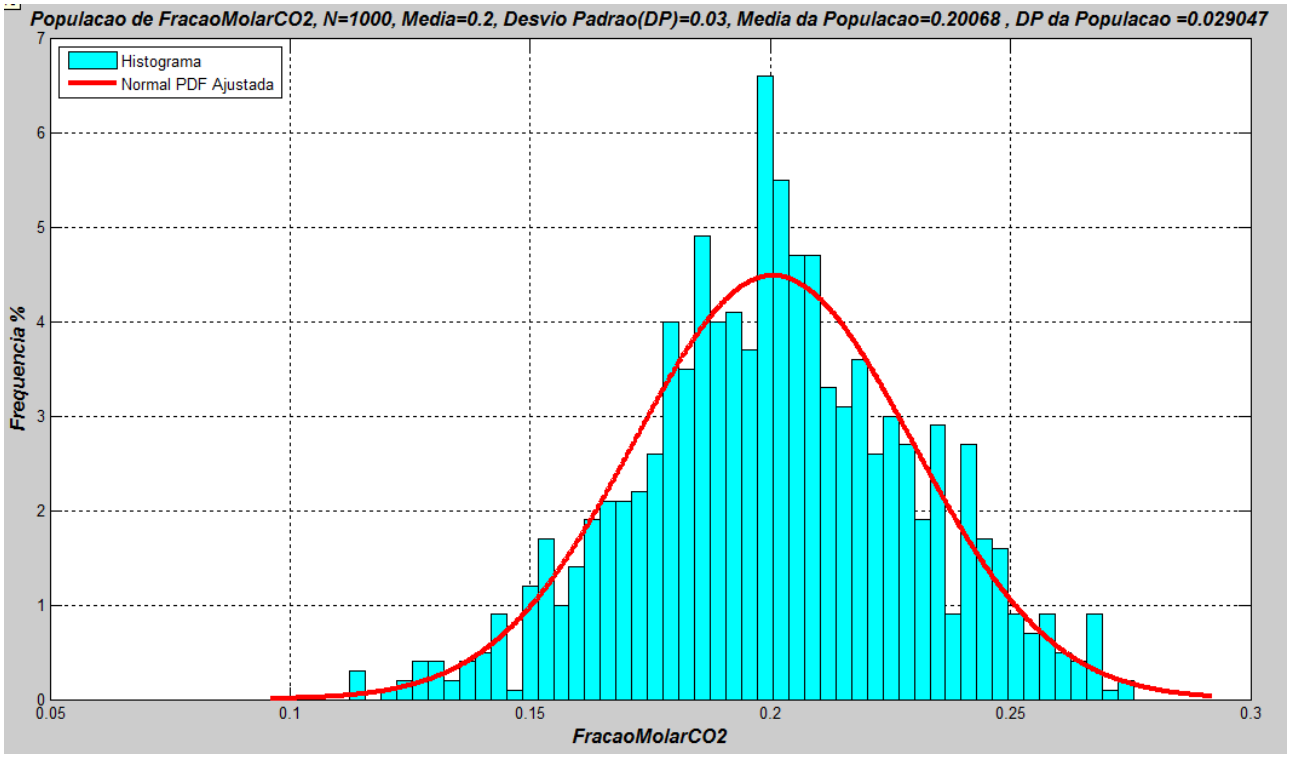


Figura 57. Histograma de Barras e Curva PDF da Fração Molar de CO_2 do Gás Natural de Entrada.

As demais variáveis de entrada que variam linearmente com as variáveis independentes da análise MMC, como as variáveis do tipo Expressão, também obedecem a uma distribuição normal, como mostra a Figura 58, referente à vazão molar do gás natural de entrada.

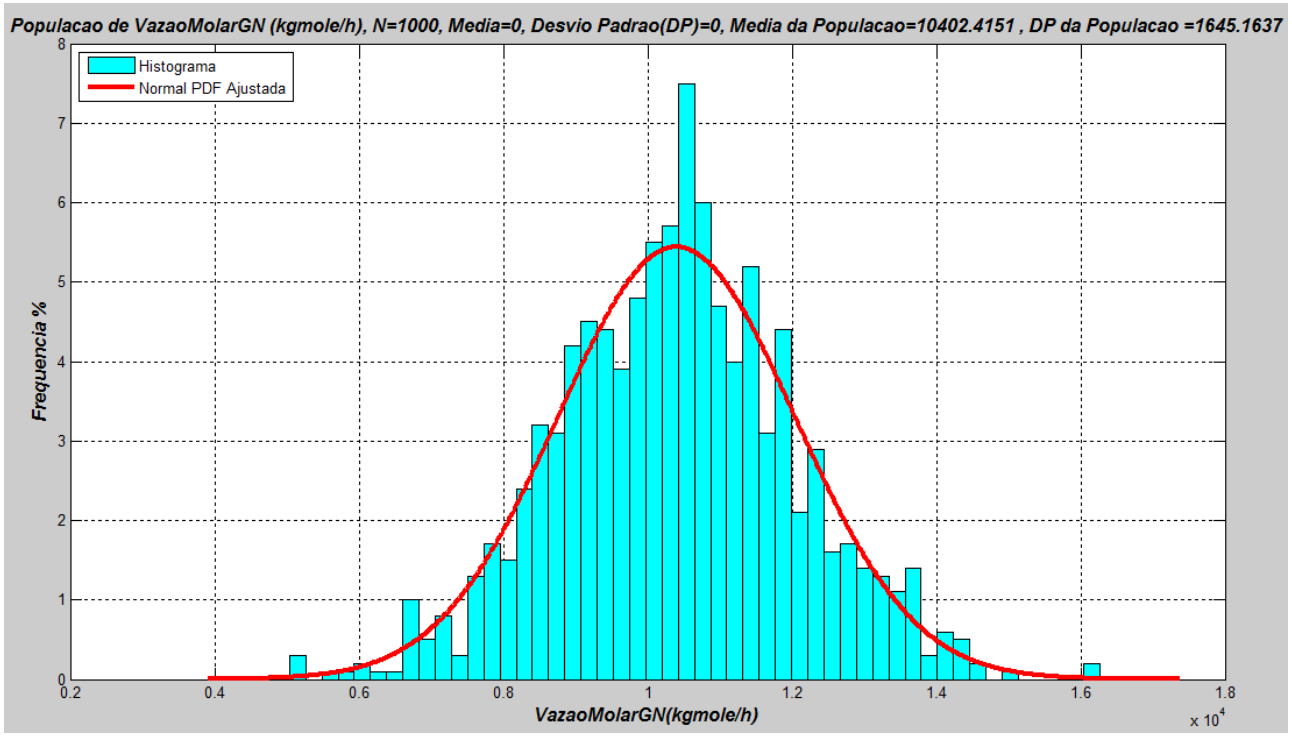


Figura 58. Histograma de Barras e Curva PDF da Vazão Molar do Gás Natural de Entrada.

Com base na análise da Tabela 7, que lista as médias e desvios padrões de algumas populações amostradas para a vazão de gás natural bruto, a população de 1000 sorteios foi considerada como representativa, visto que o desvio da média da população em relação à média teórica (diferença absoluta entre as médias / média teórica) é de 0,08% e o desvio do desvio padrão da população em relação ao desvio padrão teórico (diferença absoluta entre os desvios padrões / desvio padrão teórico) é de 5,03%, sendo que o mesmo não diminui com o aumento de população.

Tabela 7 – Médias e Desvios Padrões da Vazão de Gás Natural Bruto.

Quantidade de Rodadas	MMsm³/d					
	Média	Média População	Desvio Média	DP	DP População Média	Desvio DP
100		5,93	1,17%		0,894	10,60%
500		6,0652	1,09%		0,87606	12,39%
1000	6	6,005	0,08%	1	0,94971	5,03%
1500		6,0036	0,06%		0,93193	6,81%
10000		6,0006	0,01%		0,93199	6,80%

Visualmente também é possível analisar que o histograma gerado pela amostragem de 1000 pontos representa uma distribuição com comportamento normal. As Figuras 59 a 63 ilustram os histrogramas gerados para composição da Tabela 7.

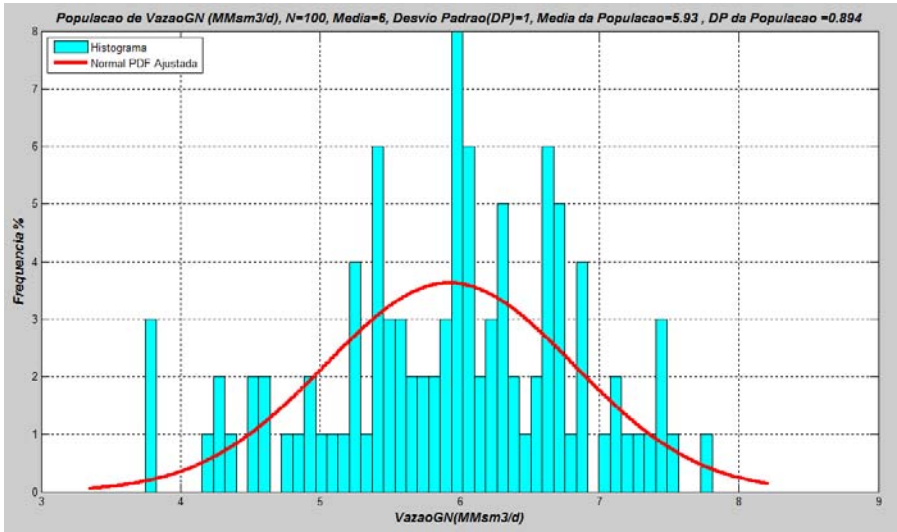


Figura 59. Histograma de Barras e Curva PDF da Vazão Molar do Gás Natural de Entrada – População Amostrada = 100.

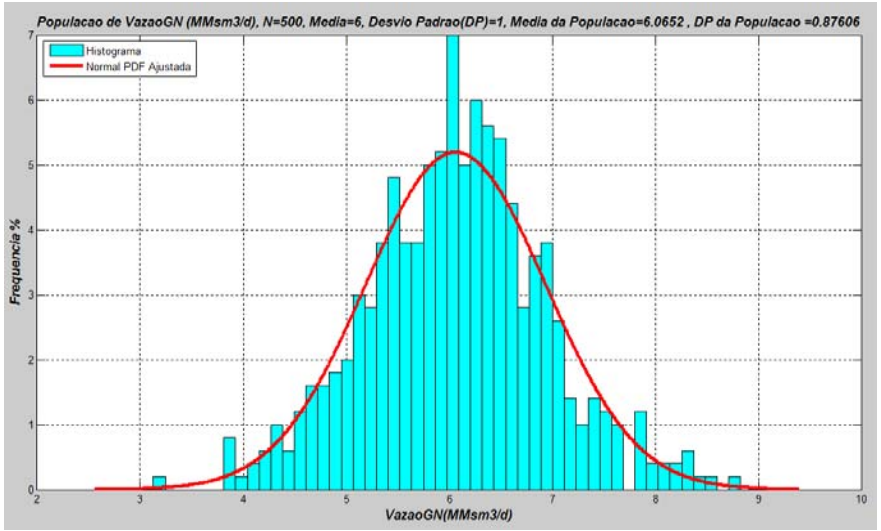


Figura 60. Histograma de Barras e Curva PDF da Vazão Molar do Gás Natural de Entrada – População Amostrada = 500.

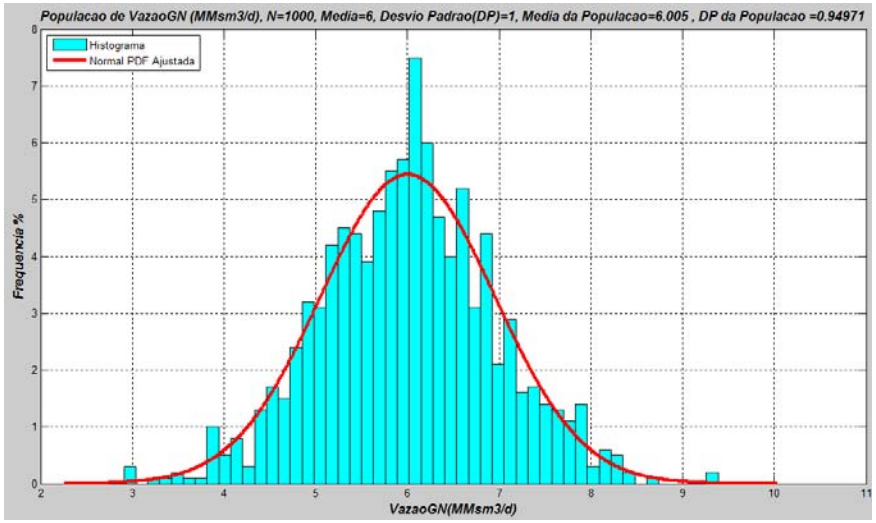


Figura 61. Histograma de Barras e Curva PDF da Vazão Molar do Gás Natural de Entrada – População Amostrada = 1000.

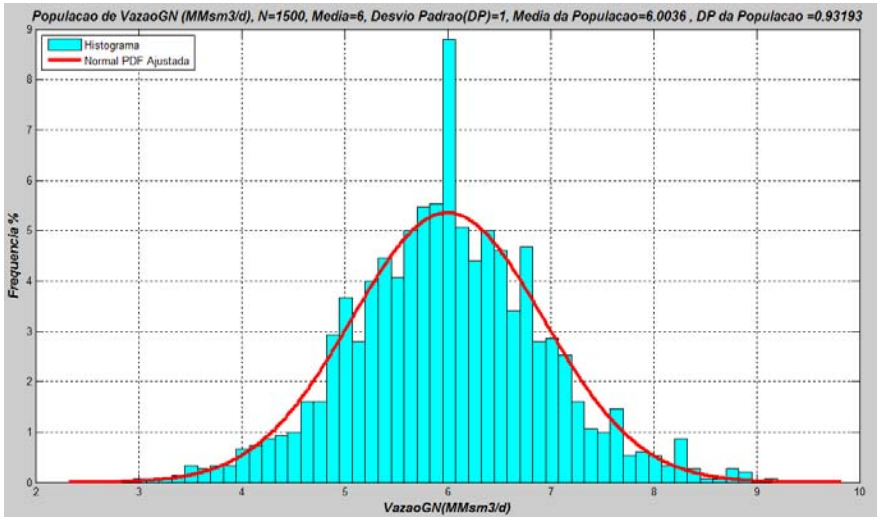


Figura 62. Histograma de Barras e Curva PDF da Vazão Molar do Gás Natural de Entrada – População Amostrada = 1500.

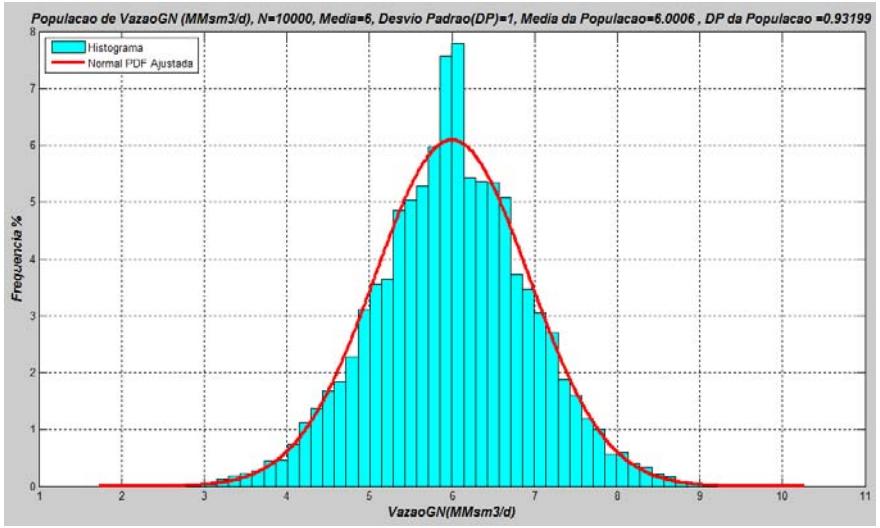


Figura 63. Histograma de Barras e Curva PDF da Vazão Molar do Gás Natural de Entrada – População Amostrada = 10000.

Através do módulo de geração da análise MMC da ferramenta "***MCAnalysis***", foram definidas as seguintes variáveis de interesse:

- **Variáveis especificadas**:
    - Corrente de gás natural final:
        1. Fração molar de CO_2;
        2. WDP;
        3. HCDP;
        4. Fração molar de C1;
- **Variáveis de consumo de energia elétrica**:
    - Compressão:
        5. Consumo do compressor inicial
        6. Consumo do compressor após desidratação do gás natural;
        7. Consumo dos compressores dos cinco estágios de compressão do CO_2;
    - Troca térmica:
        8. Consumo do resfriador da compressão inicial
        9. Consumo do resfriador da compressão após desidratação do gás natural;
        10. Consumo dos resfriadores dos cinco estágios de compressão do CO_2;
        11. Consumo do resfriador da coluna de regeneração de TEG.
- **Variáveis de correntes de produtos**:
    - Corrente de gás natural final:
        12. Vazão molar;
    - Corrente de condensáveis:
        13. Vazão molar;
        14. Fração molar de C1;
    - Corrente de CO2 para reinjeção no poço:
        15. Vazão molar;
        16. Fração molar de CO2.

Após a realização da análise pela ferramenta, foram gerados histogramas de barras da distribuição das populações das variáveis de saída, assim como uma aproximação da curva PDF normal das distribuições. Como complemento da análise também é gerado um

segundo histograma contendo a distribuição acumulada das variáveis de saída assim como uma aproximação da curva CDF normal das distribuições.

Como o processo analisado é fortemente não linear, são esperados comportamentos das variáveis de saída tanto próximos quanto bem distintos de uma distribuição normal.

A análise MMC será descrita a partir da variável de saída fração molar de CO_2 da corrente de gás natural final (variável de saída 1), que possui especificação de valor máximo de 0,03. A Figura 64 ilustra o histograma de barras e a aproximação da curva PDF de distribuição normal para esta variável. A população amostrada da variável atingiu média amostral de 0,029189 e desvio padrão amostral de 0,010253.

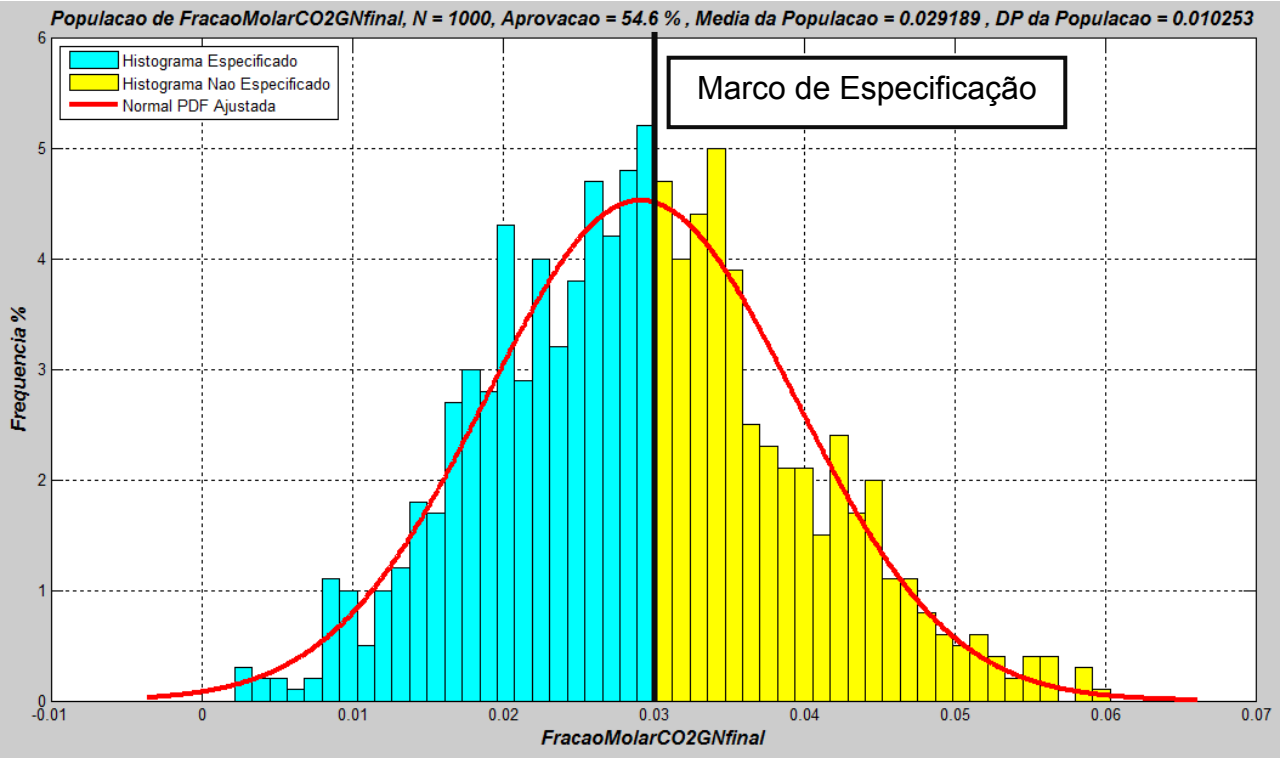


Figura 64. Histograma de Barras e Curva PDF da Fração Molar de CO_2 do Gás Natural Final.

Pela análise da Figura 64, pode-se perceber que a fração molar de CO_2 do gás natural final apresenta um comportamento relativamente próximo a uma distribuição normal, com formato semelhante à da vazão da corrente de entrada de gás natural. Além disso, como o CO_2 é removido do gás natural pelos módulos de membrana, cujo um dos principais dimensionamentos fixos, além da pressão do permeado e da temperatura de entrada, é a área, pode-se concluir que a vazão de entrada do gás é a variável que mais influencia a remoção de CO_2, sendo determinante para seu comportamento.

Ainda com base na Figura 64 pode-se concluir que o dimensionamento proposto para o projeto de processamento *offshore* de gás natural atende à especificação de concentração máxima de CO_2 no gás natural final em 54,6% dos casos, o que faz com que o projeto não esteja dentro da premissa de atendimento a pelo menos 75% dos casos. Cabe considerar-se o aumento da área dos módulos de membrana para ajustar esta especificação. A população que atende à especificação se encontra desenhada em azul na Figura 64, enquanto que a população que não atende se encontra desenhada em amarelo. Visualmente, a porcentagem de atendimento da especificação são as barras desenhadas em azul e a porcentagem de não atendimento, as barras desenhadas em amarelo.

A Figura 65 ilustra o histograma acumulado de barras e a aproximação da curva CDF de distribuição normal para a fração molar de CO_2 do gás natural final.

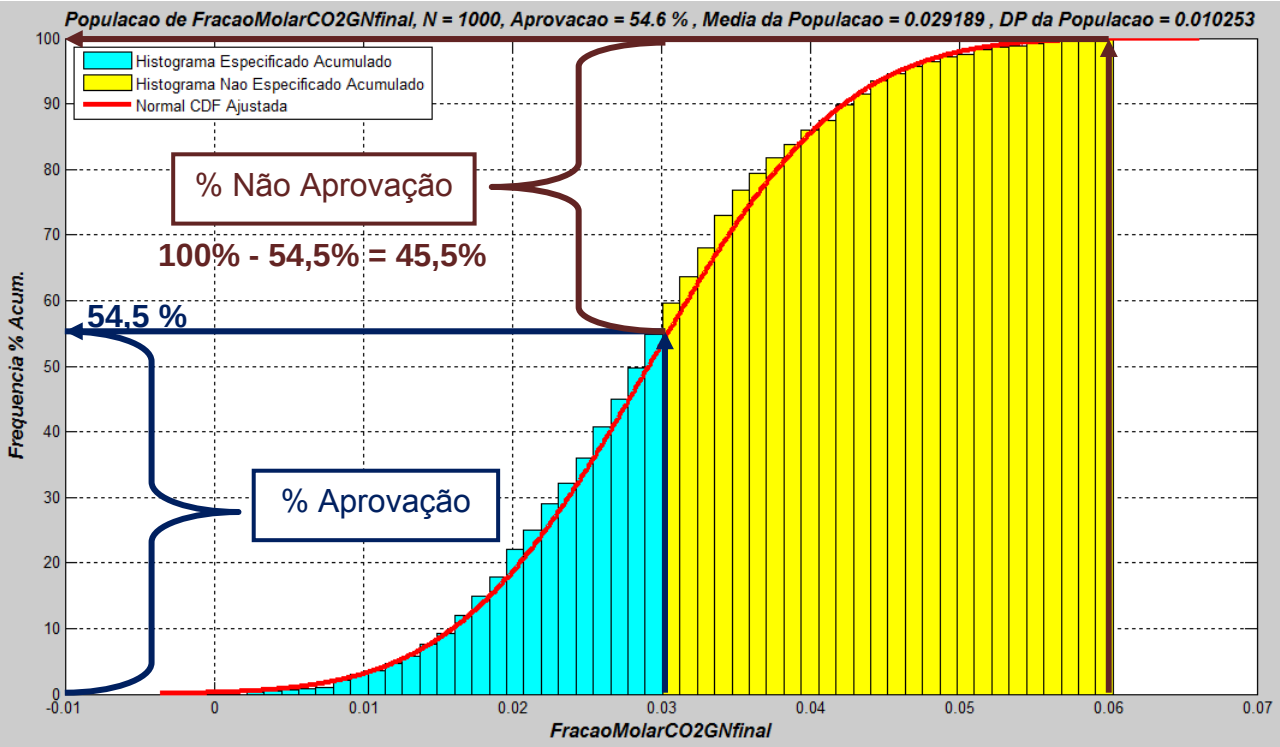


Figura 65. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Fração Molar de CO_2 do Gás Natural Final.

Pela análise da Figura 65, como a CDF representa a integral da PDF, o histograma de barras representa agora histograma cumulativo da distribuição criado a partir do histograma simples na Figura 64. Dessa maneira, as barras da Figura 65 representam o somatório do seu valor correspondente na Figura 64 com todas as barras anteriores. Sendo assim, a altura da barra no ponto de especificação representa o valor da porcentagem de casos aprovados. Como a altura da última barra apresenta

evidentemente valor de 100%, a porcentagem de não aprovação será igual a 100% descontados da porcentagem de aprovação como mostrado na Figura 65.

A Figura 66 e a Figura 67 ilustram os histogramas de barras e aproximações das curvas PDF e CDF de distribuição normal para o WDP do gás natural final (variável de saída 2), cuja especificação de valor máximo é de – 45°C a 1 atm. Pela análise dessas Figuras, pode-se concluir que o WDP do gás natural final aparentemente não obedece a uma distribuição normal e que o processo proposto atendeu a 100% dos casos. Nos cabeçalhos destas figuras são encontrados valores de média amostral (-53,4ºC) e desvio padrão amostral (0,612ºC) desta variável resposta.

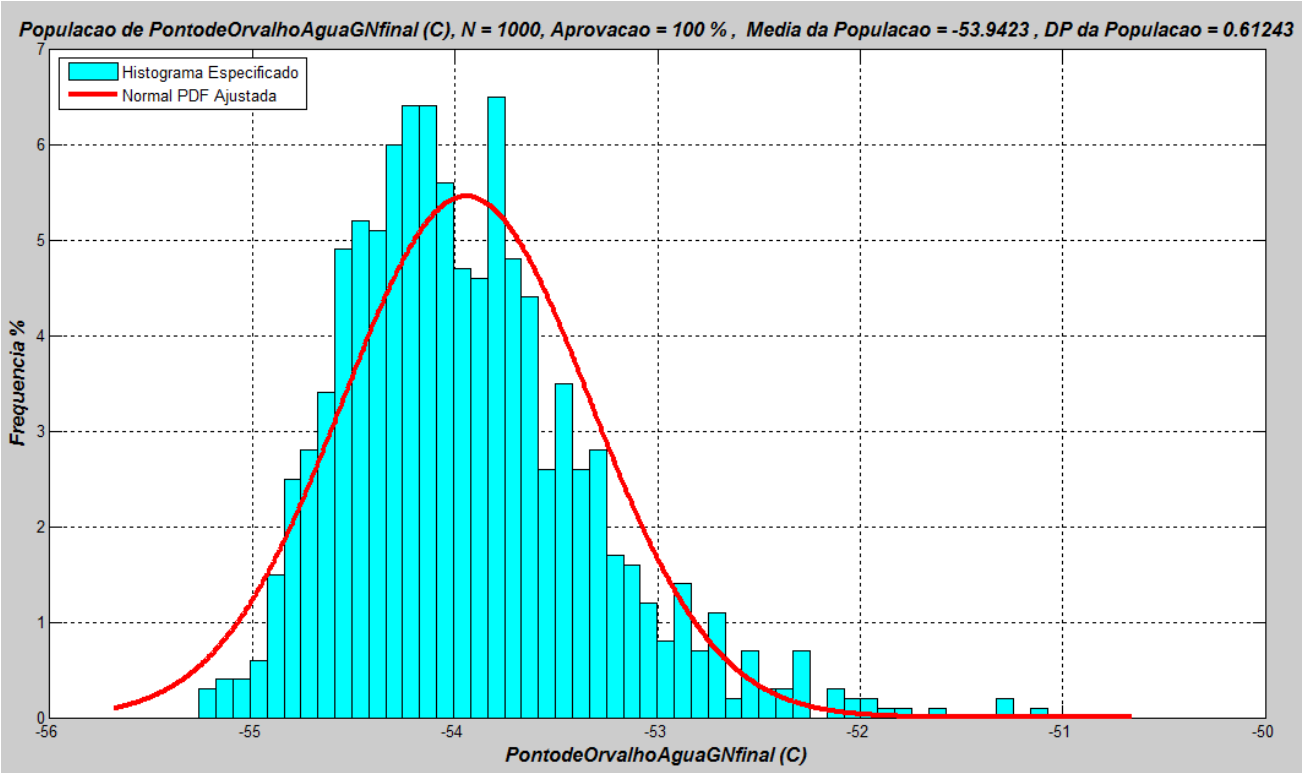


Figura 66. Histograma de Barras e Curva PDF do WDP do Gás Natural de Entrada.

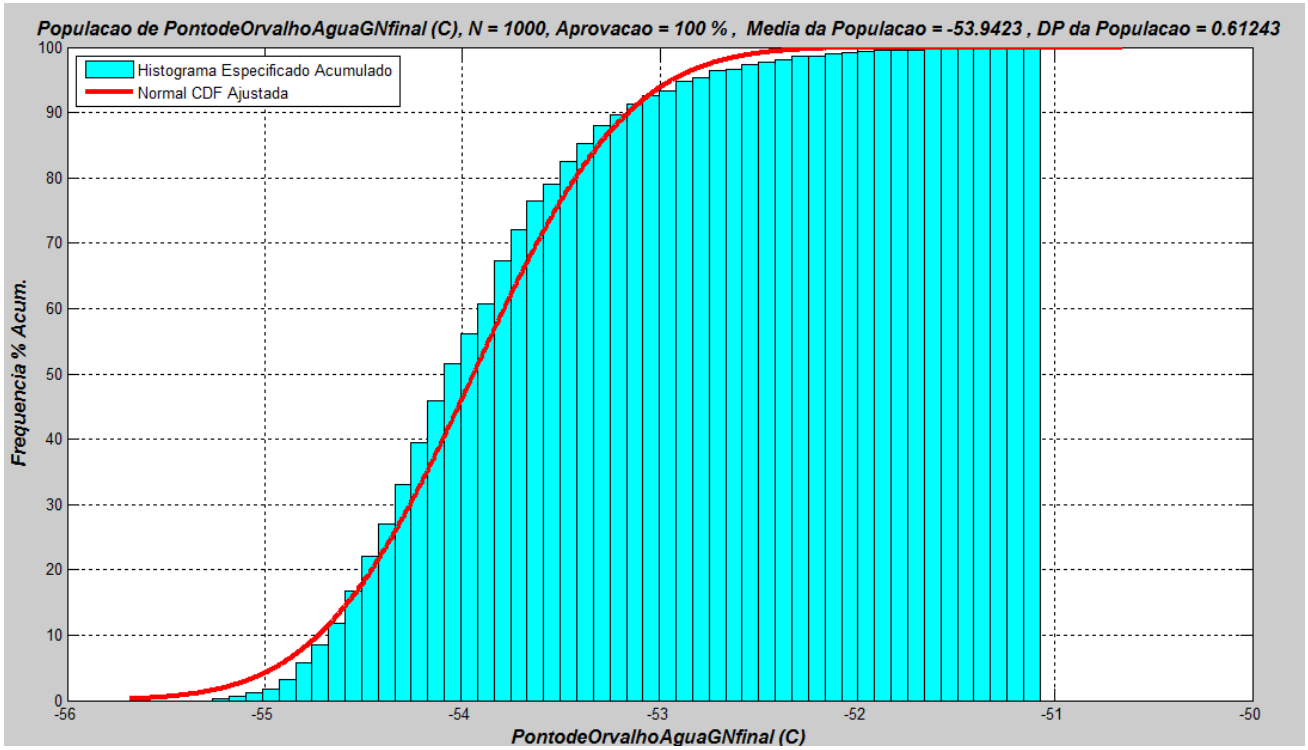


Figura 67. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF do WDP do Gás Natural Final.

A Figura 68 e a Figura 69 ilustram os histogramas e traçado de PDF e CDF normais para o HCDP do gás natural final, cuja especificação de valor máximo é de 0°C a 45 bar. Pelas Figuras, conclui-se que o HCDP do gás natural final não obedece a uma distribuição normal e que o processo atendeu a 100% dos casos. Nas figuras há valores de média amostral (-24,84ºC) e desvio padrão amostral (2,18ºC) desta variável resposta.

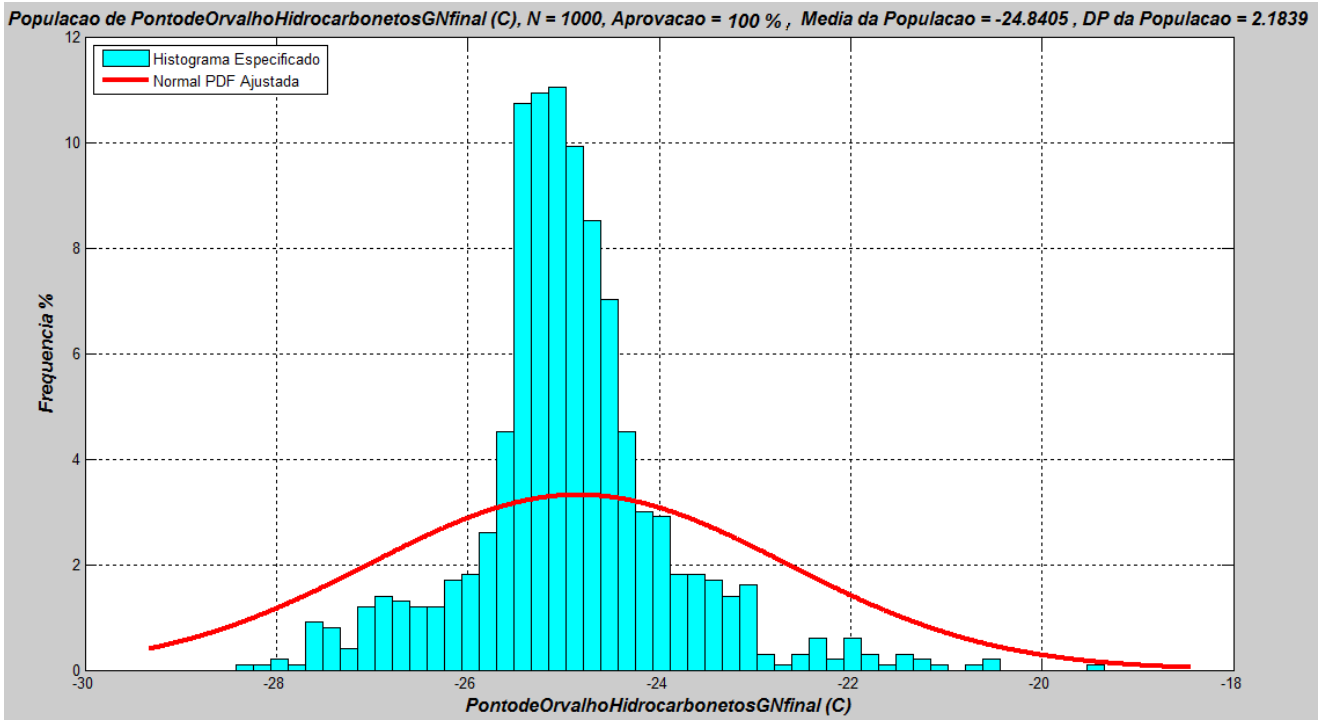


Figura 68. Histograma de Barras e Curva PDF do HCDP do Gás Natural de Entrada.

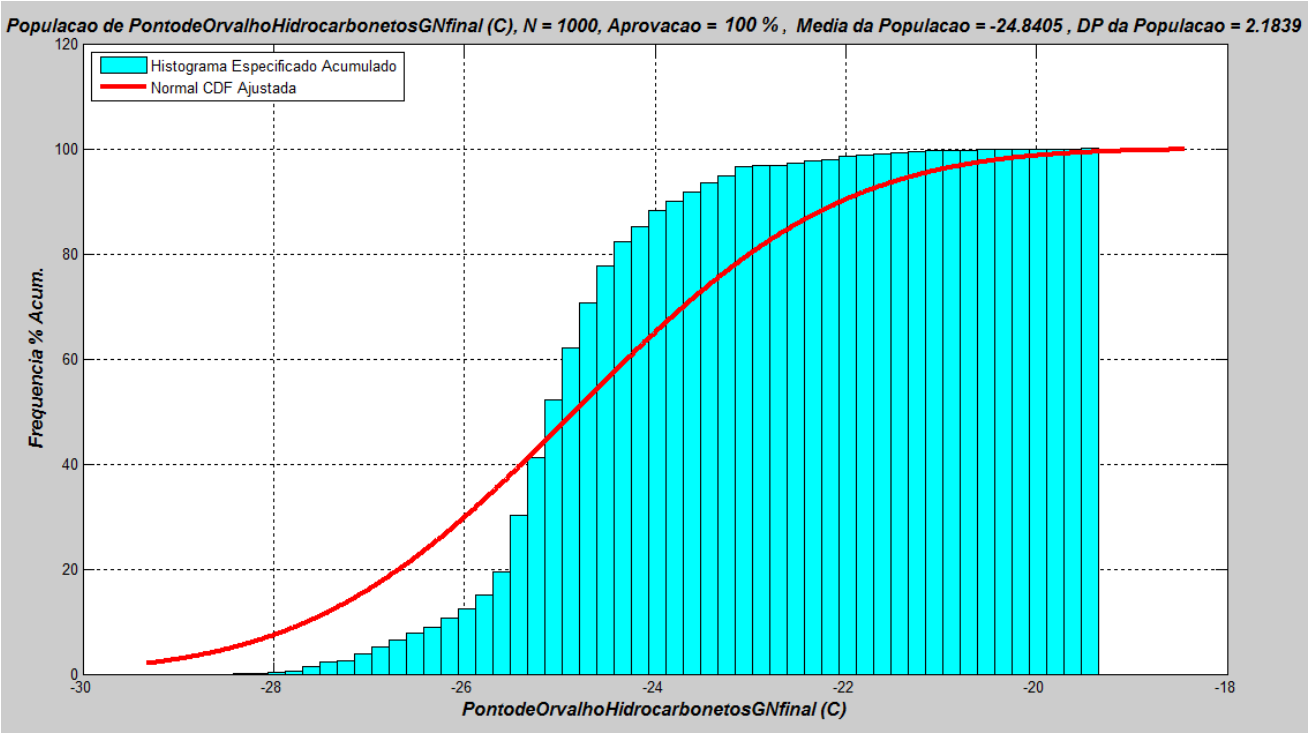


Figura 69. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF do HCDP do Gás Natural Final.

A Figura 70 e a Figura 71 ilustram os histogramas de barras e aproximações das curvas PDF e CDF de distribuição normal para a fração molar de C1 do gás natural final (variável de saída 4), cuja especificação de valor mínimo é de 85%. Pela análise dessas Figuras, pode-se concluir que a fração molar de C1 do gás natural final apresenta um comportamento relativamente próximo a uma distribuição normal e que o processo proposto atendeu a 100% dos casos. Nos cabeçalhos destas figuras são encontrados valores de média amostral (0,9467) e desvio padrão amostral (0,0098) desta variável resposta.

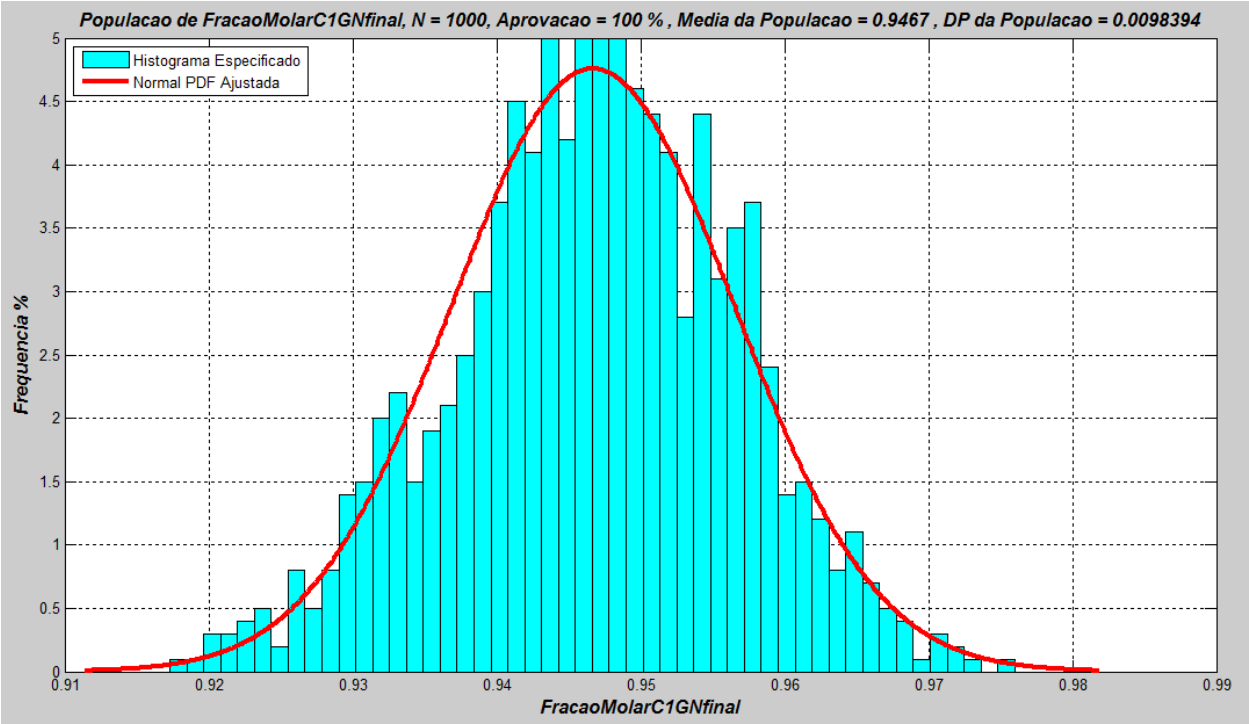


Figura 70. Histograma de Barras e Curva PDF da Fração Molar de C1 do Gás Natural Final.

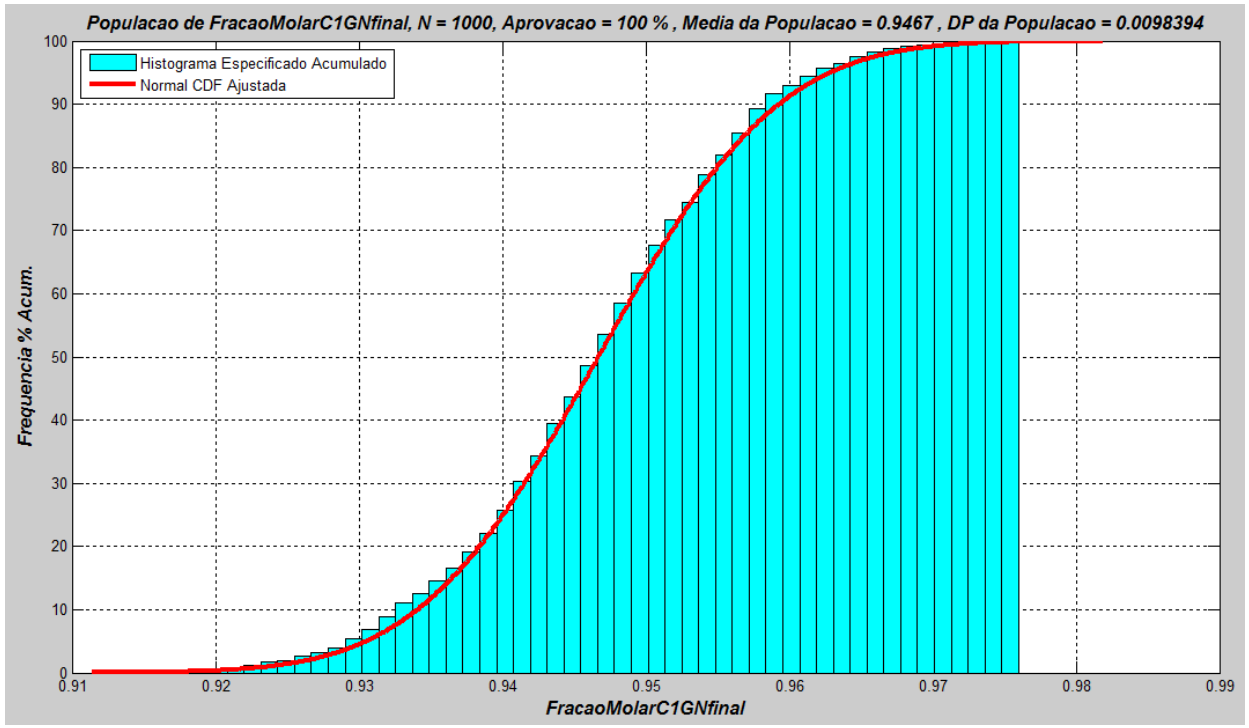


Figura 71. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Fração Molar de C1 do Gás Natural Final.

Para as demais variáveis, descritas a seguir, nenhuma especificação foi definida, logo todos os histogramas irão refletir 100% de aceite. Além de especificações, caso haja valores recomendados ou desejados, os mesmos também podem ser incluídos para análise.

As Figuras 72 a 85 mostram os histogramas de barras e aproximações das curvas PDF e CDF de distribuição normal para as variáveis de saída 5 a 11, referentes ao consumo de energia elétrica por processos de compressão e de aquecimento que é desejável que sejam minimizados. A Tabela 8 resume os valores das médias amostrais, desvios padrões amostrais e comportamento das distribuições referente a essas variáveis. Pela análise da Tabela 8, é possível observar que o consumo de energia do regenerador de TEG está em ordem de grandeza menor quando comparado ao consumo dos equipamentos responsáveis pelas etapas de compressão, o que comprova que tais etapas correspondem ao maior consumo de energia no processamento de gás natural.

Além disso, no que diz respeito aos compressores, a simulação não impôs nenhum limite inferior ou superior de potências, no entanto, caso a utilização dos mesmos fosse de interesse analisar, tais limites poderiam ter sido considerados como restritivos nesta etapa da análise MMC.

Tabela 8 – Médias Amostrais, Desvios Padrões Amostrais e Comportamentos das Distribuições das Variáveis de Consumo de Energia Elétrica.

Variável	Unidade	Média Amostral	Desvio Padrão Amostral	Comportamento
Potência Compressor Inicial	KJ/h	$4{,}73 \times 10^7$	$7{,}49 \times 10^6$	Próximo Distribuição Normal
Potência Compressor JT	KJ/h	$1{,}76 \times 10^7$	$2{,}62 \times 10^6$	Próximo Distribuição Normal
Potência Compressores CO_2	KJ/h	$5{,}88 \times 10^7$	$6{,}01 \times 10^6$	Próximo Distribuição Normal
Potência Trocador Inicial	KJ/h	$5{,}96 \times 10^7$	$9{,}42 \times 10^6$	Próximo Distribuição Normal
Potência Trocador JT	KJ/h	$1{,}90 \times 10^7$	$3{,}04 \times 10^6$	Próximo Distribuição Normal
Potência Trocadores CO_2	KJ/h	$7{,}83 \times 10^7$	$9{,}27 \times 10^6$	Próximo Distribuição Normal
Potência Regenerador	KJ/h	$2{,}99 \times 10^5$	$1{,}24 \times 10^4$	Distante Distribuição Normal

As variáveis de saída 12 a 16, referentes às correntes de produtos, estão ilustradas nas Figuras 86 a 95. . A Tabela **8**9 resume os valores das médias amostrais, desvios padrões amostrais e comportamento das distribuições referente a essas variáveis.

Tabela 9 – Médias Amostrais, Desvios Padrões Amostrais e Comportamentos das Distribuições das Variáveis de Correntes de Produtos.

Variável	Unidade	Média Amostral	Desvio Padrão Amostral	Comportamento
Vazão Molar GNfinal	kgmole/h	7536,67	1455,83	Próximo Distribuição Normal
Fração Molar C1 Pesados	-	0,097393	0,0088	Próximo Distribuição Normal
Vazão Molar Pesados	kgmole/h	41,94	9,77	Distante Distribuição Normal
Fração Molar CO_2 CO_2reinjeção	-	0,64812	0,0452	Distante Distribuição Normal
Vazão Molar CO_2reinjeção	kgmole/h	2824,94	304,35	Próximo Distribuição Normal

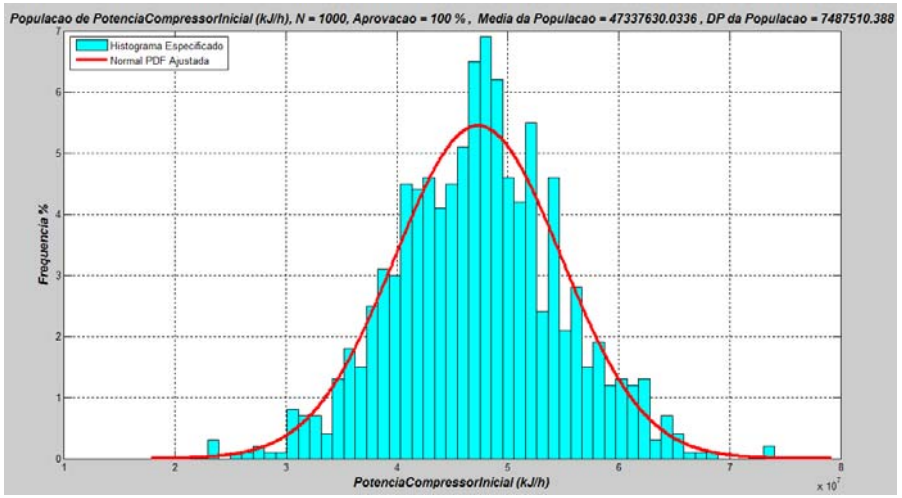


Figura 72. Histograma de Barras e Curva PDF da Potência do Compressor Inicial.

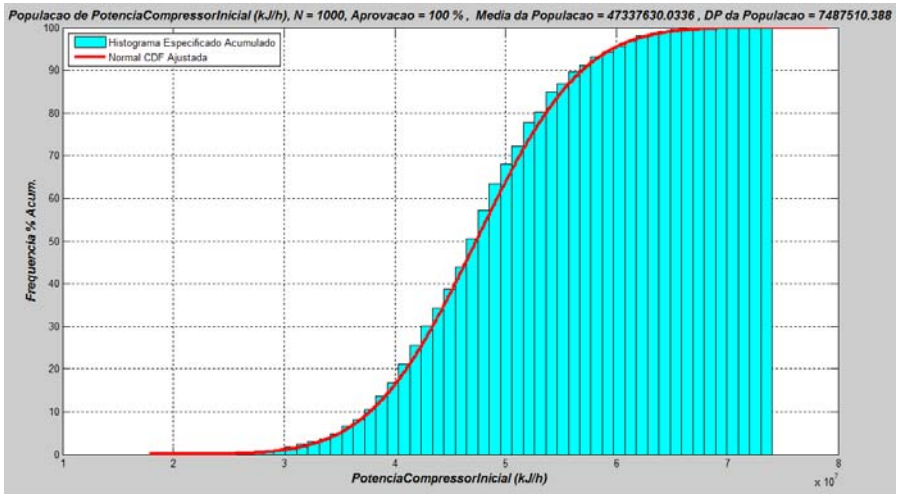


Figura 73. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Potência do Compressor Inicial.

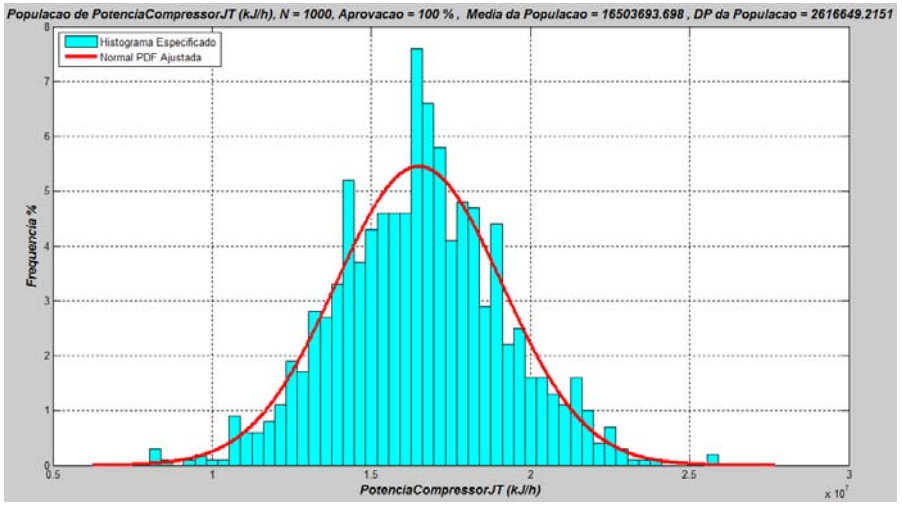


Figura 74. Histograma de Barras e Curva PDF da Potência do Compressor Após Desidratação do Gás Natural.

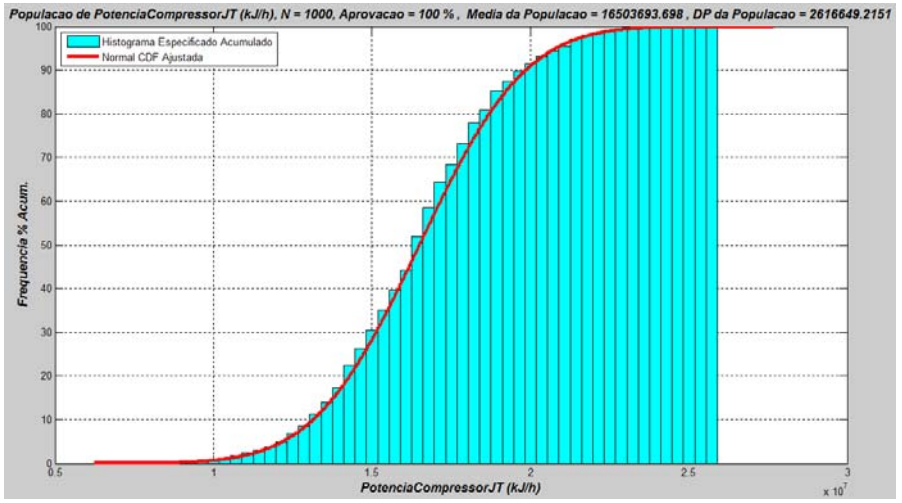


Figura 75. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Potência do Compressor Após Desidratação do Gás Natural.

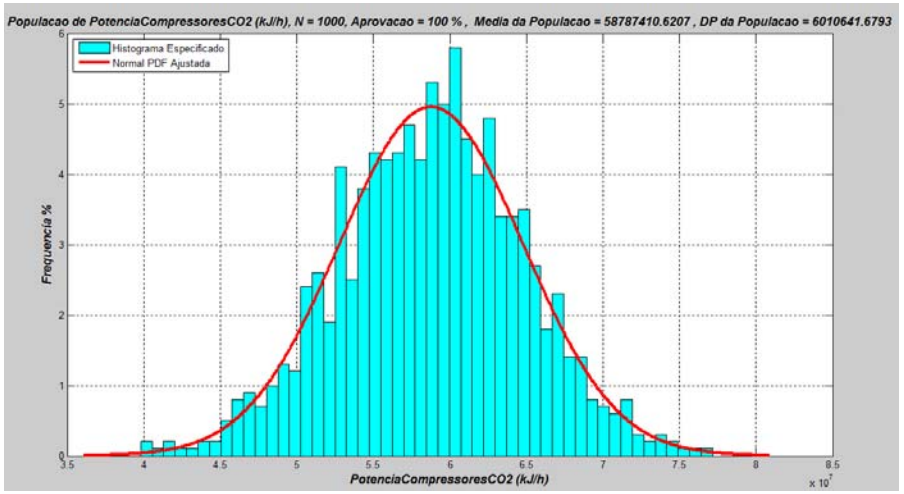


Figura 76. Histograma de Barras e Curva PDF da Potência dos Compressores dos Cinco Estágios de Compressão do CO2.

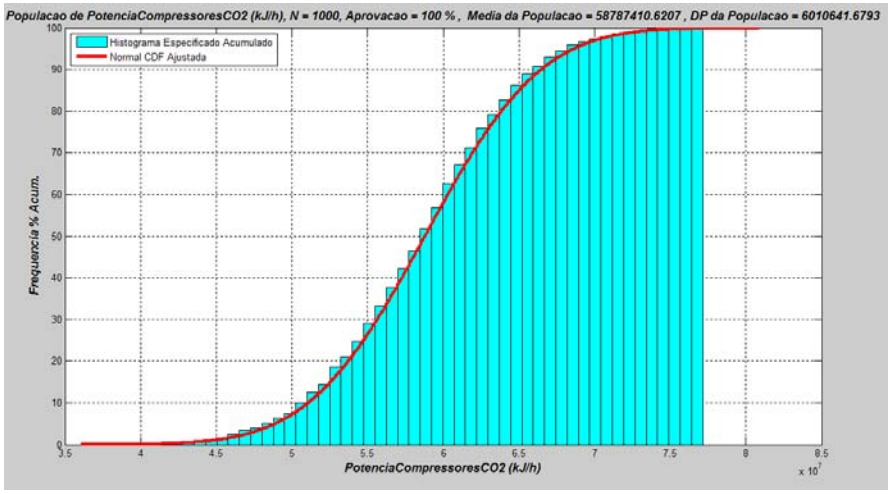


Figura 77. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Potência dos Compressores dos Cinco Estágios de Compressão do CO2.

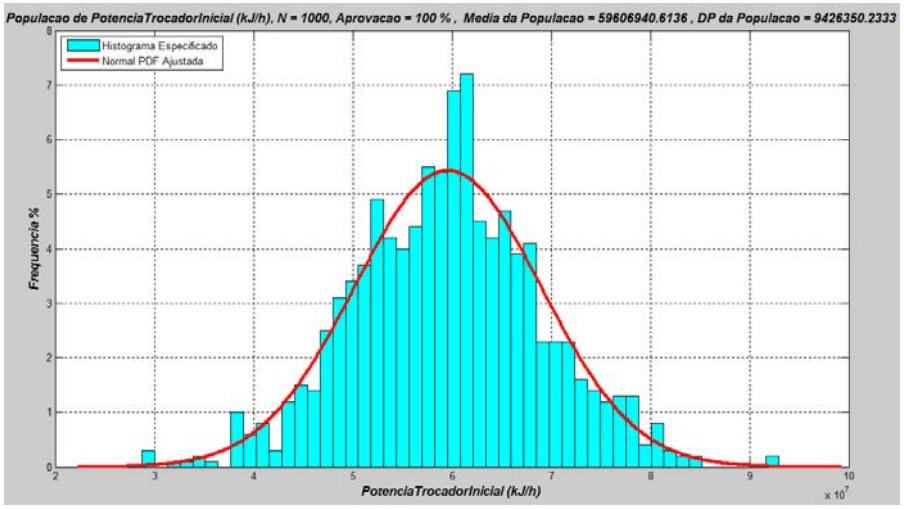


Figura 78. Histograma de Barras e Curva PDF da Potência do Trocador Inicial.

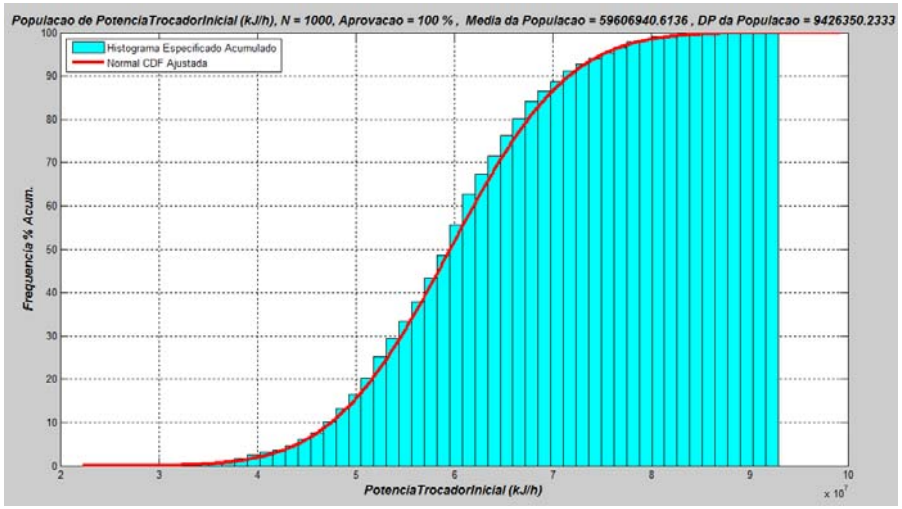


Figura 79. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Potência do Trocador Inicial.

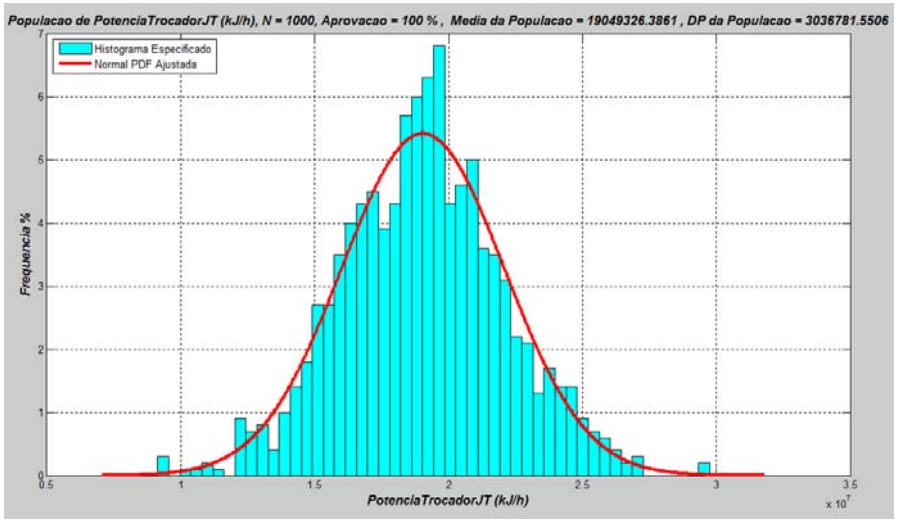


Figura 80. Histograma de Barras e Curva PDF da Potência do Trocador Após Desidratação do Gás Natural.

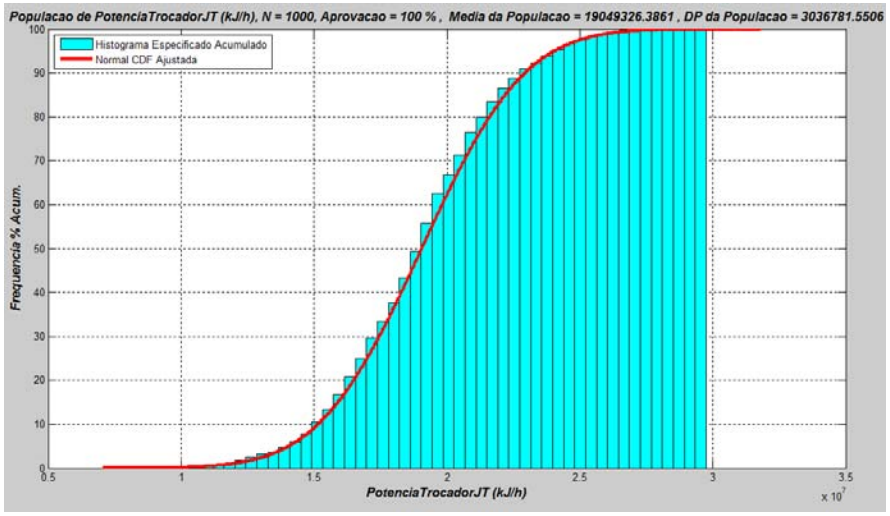


Figura 81. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Potência do Trocador do Compressor Após Desidratação do Gás Natural.

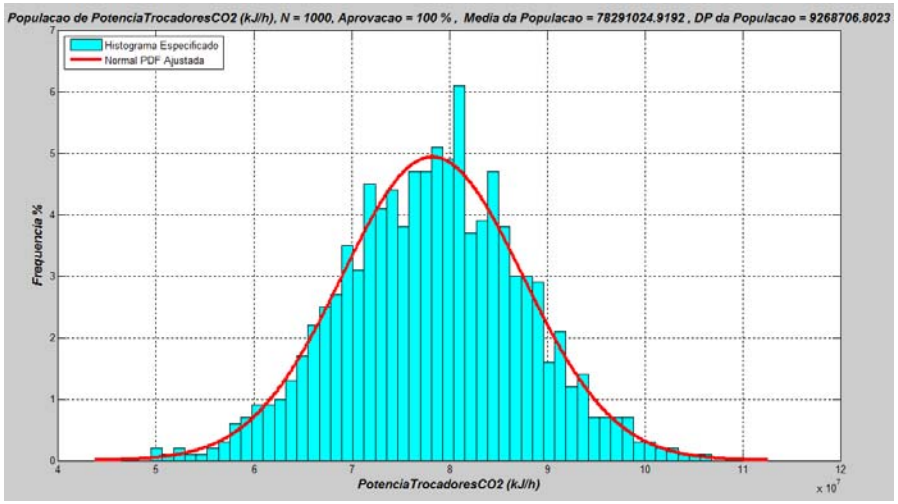


Figura 82. Histograma de Barras e Curva PDF da Potência dos Trocadores dos Cinco Estágios de Compressão do CO2.

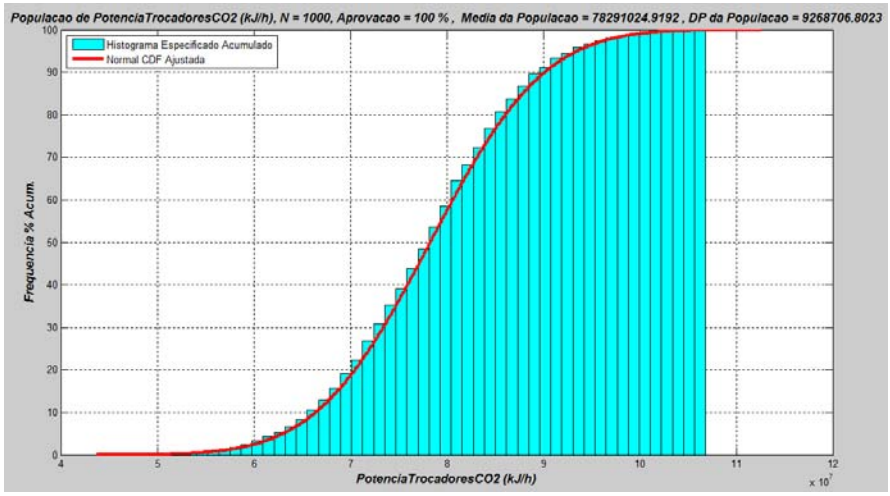


Figura 83. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Potência dos Trocadores dos Cinco Estágios de Compressão do CO2.

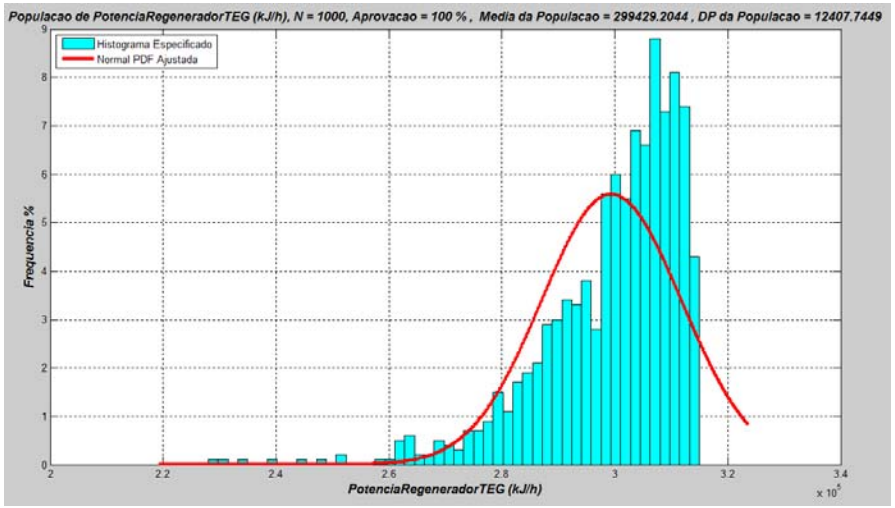


Figura 84. Histograma de Barras e Curva PDF da Potência do Resfriador da Coluna de Regeneração de TEG.

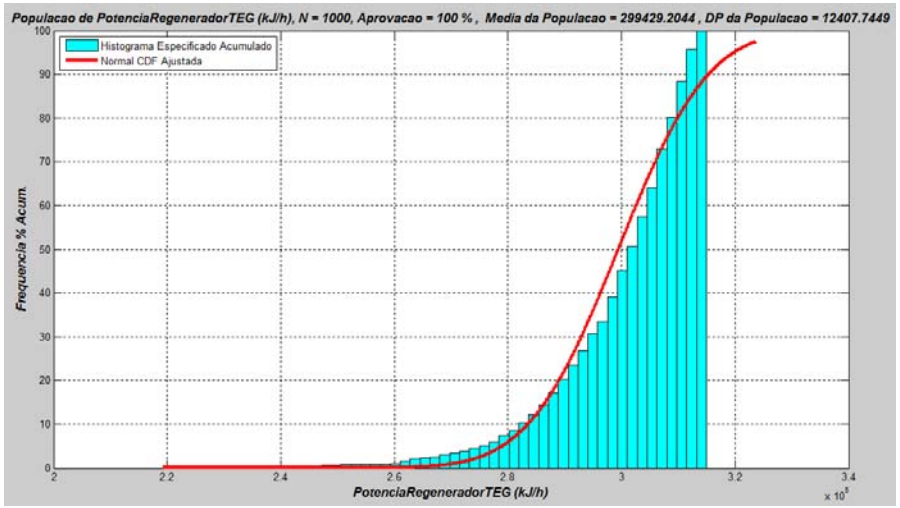


Figura 85. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Potência do Resfriador da Coluna de Regeneração de TEG.

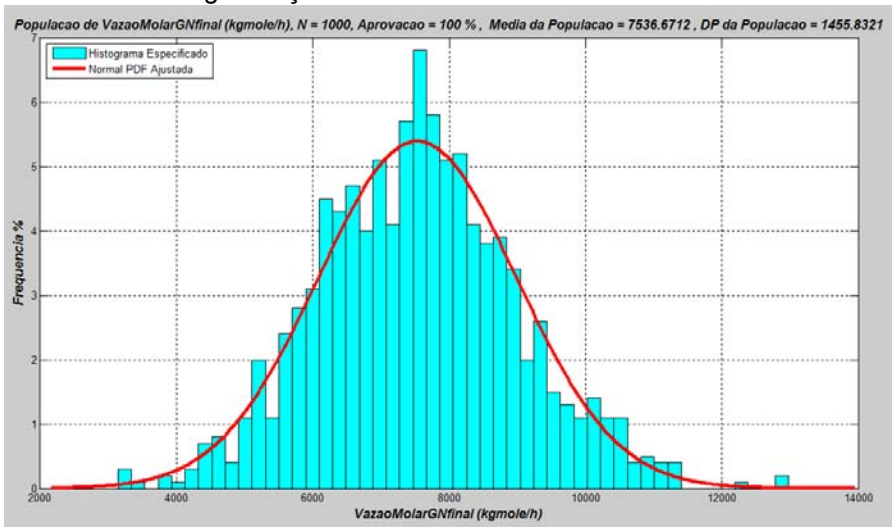


Figura 86. Histograma de Barras e Curva PDF da Vazão Molar de Gás Natural Final.

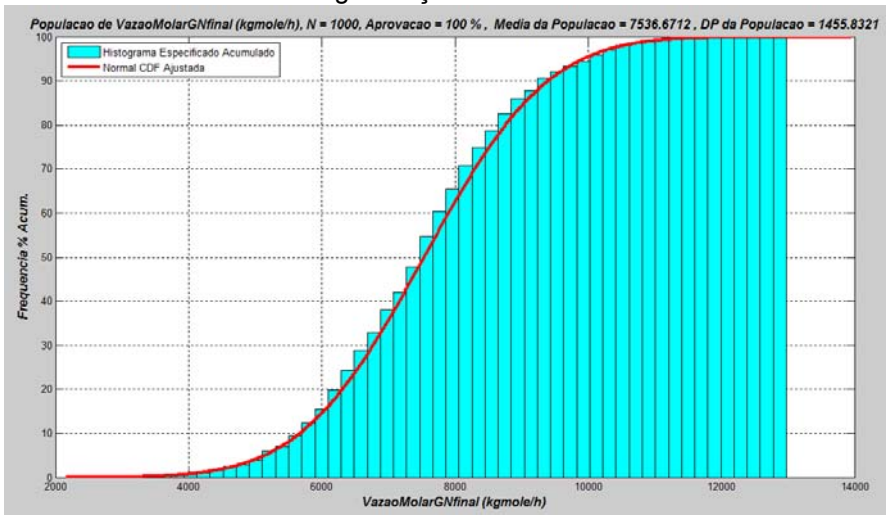


Figura 87. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Vazão Molar de Gás Natural Final.

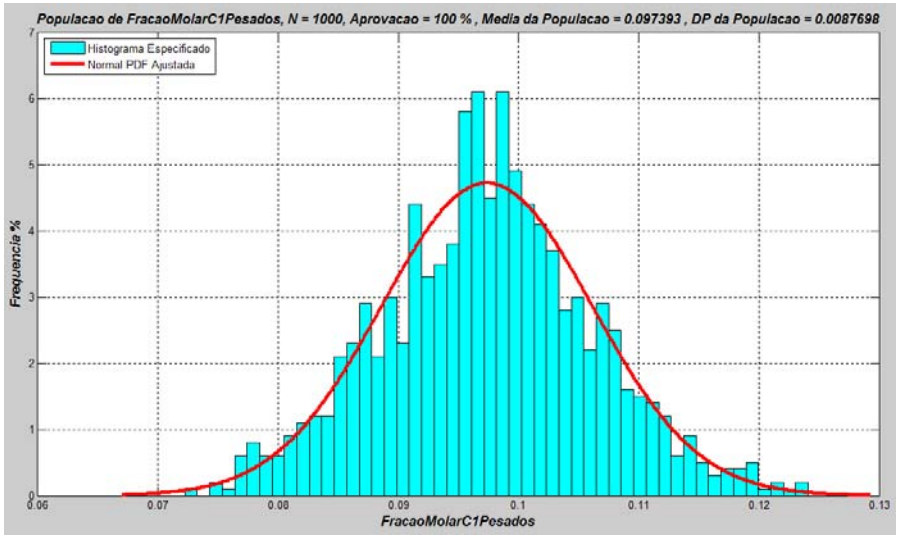


Figura 88. Histograma de Barras e Curva PDF da Fração Molar de C1 nos Pesados.

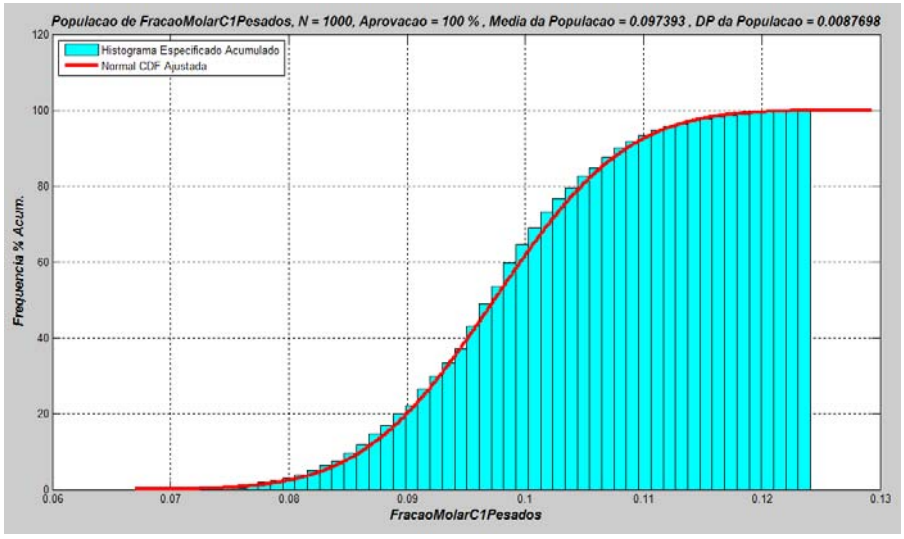


Figura 89. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Fração Molar de C1 nos Pesados.

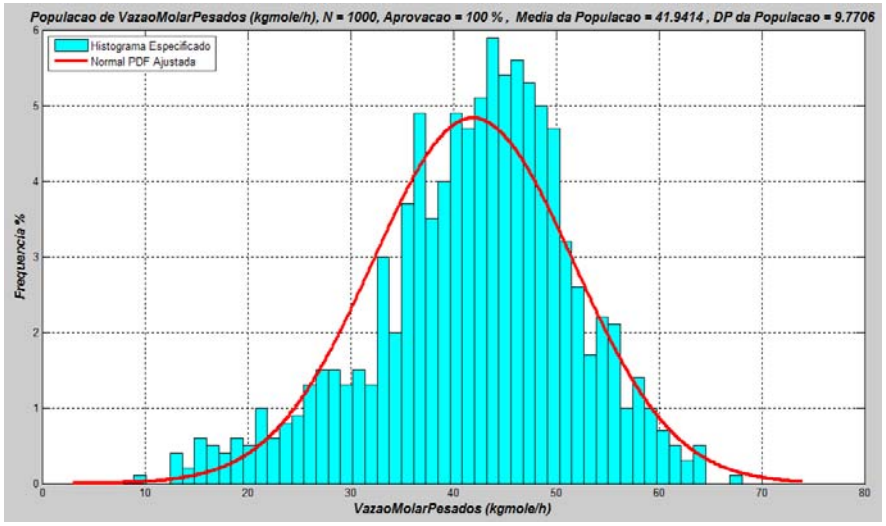


Figura 90. Histograma de Barras e Curva PDF da Vazão Molar de Pesados.

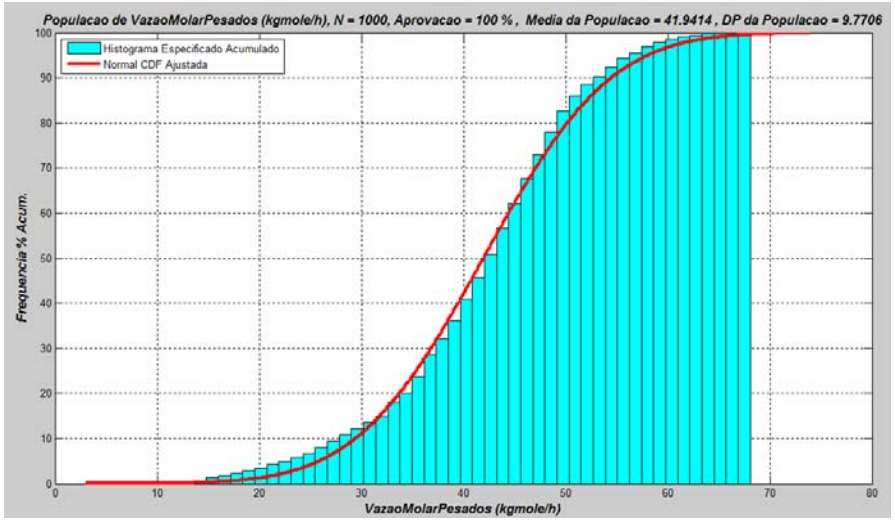


Figura 91. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Vazão Molar de Pesados.

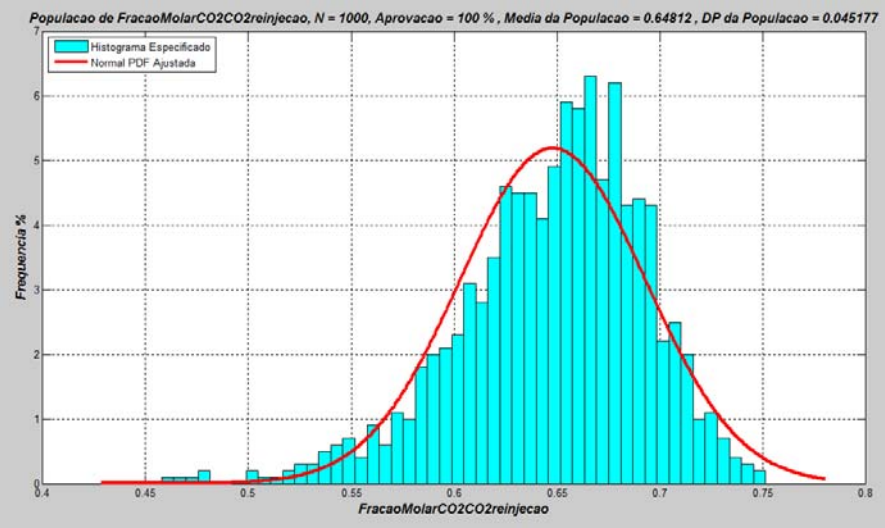


Figura 92. Histograma de Barras e Curva PDF da Fração Molar de CO_2 no CO_2 para reinjeção.

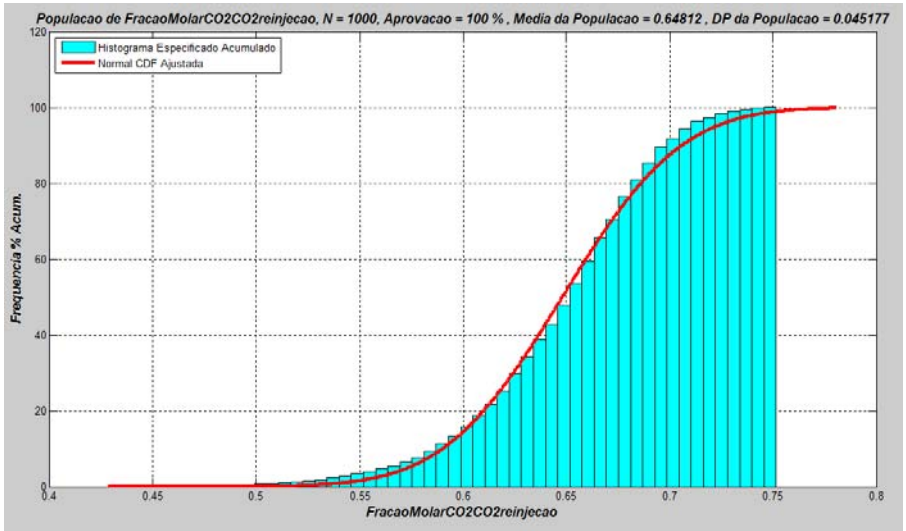


Figura 93. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Fração Molar de CO_2 no CO_2 para reinjeção.

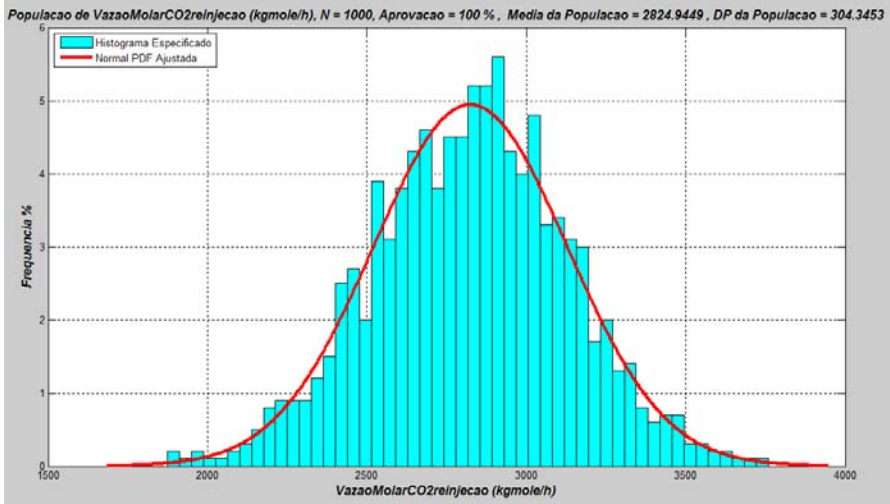


Figura 94. Histograma de Barras e Curva PDF da Vazão Molar de CO_2 para reinjeção.

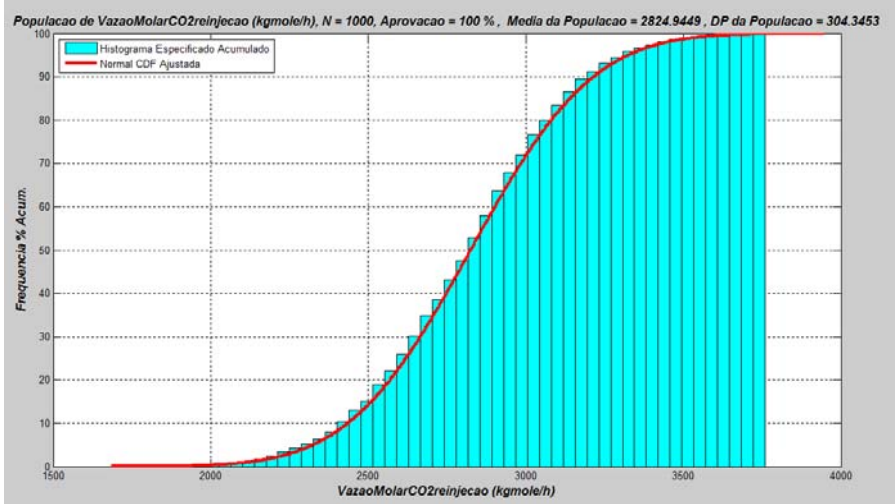
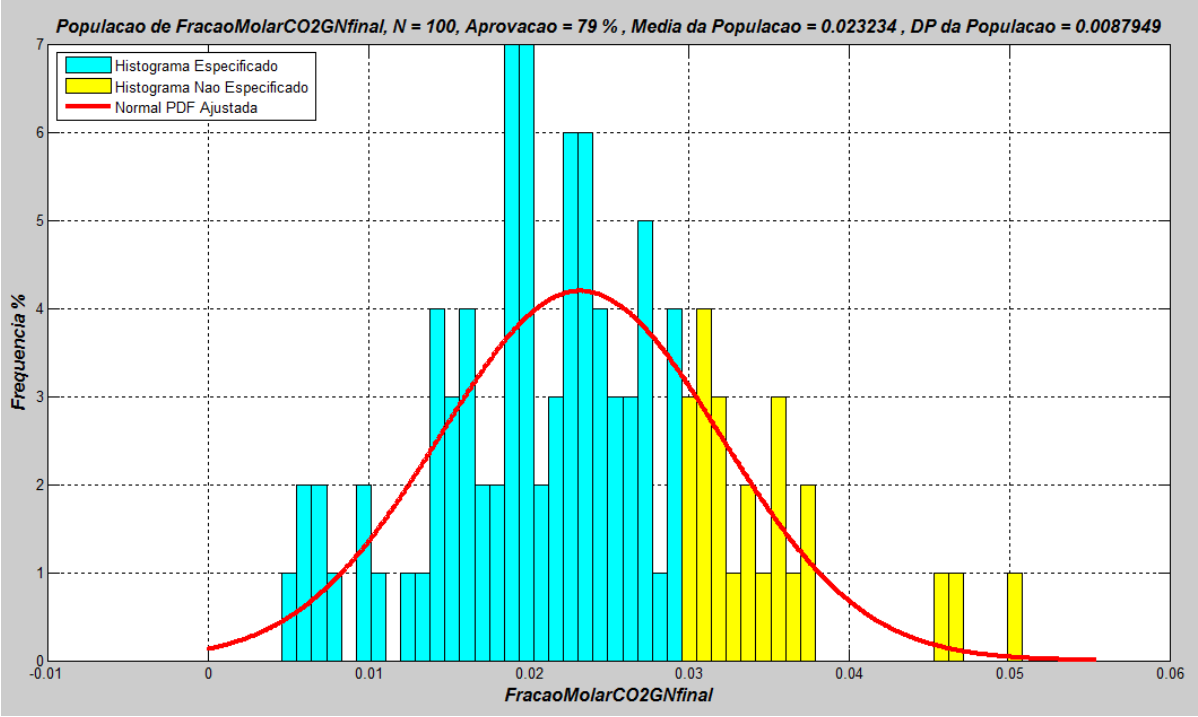


Figura 95. Histograma Acumulado de Barras e Curva CDF da Vazão Molar de CO_2 para reinjeção.

Ao analisar todos os histogramas e curvas de distribuições normais, é possível perceber que muitas variáveis de saída não seguem o padrão de distribuição normal das variáveis de entrada, o que mostra que o processamento de gás natural proposto é um processo extremamente não linear, como esperado. Se o processo fosse linear, soluções analíticas em substituição à metodologia Monte Carlo poderiam ser facilmente propostas para estudar a modelagem do processo.

Para a variável especificada fração molar de CO_2 no gás natural final, que fugiu à especificação de atendimento a pelo menos 75% dos casos, a área de ambos os módulos de membranas foi aumentada em aproximadamente 10% e a análise MMC foi realizada para uma amostragem de 100 pontos a título de comparação. A área, além de influenciar a resposta do processo, também se apresenta como uma opção viável para redimensionamento do projeto devido à flexibilidade de seu ajuste nos módulos de membranas. Como 100 pontos não é uma quantidade amostral suficiente para MMC, é recomendável que a mesma análise seja rodada com pelo menos 1000 pontos para um resultado mais apurado. Com este aumento de 10% na área da bateria MP, a porcentagem de atendimento a essa especificação passou a ser 79%, como mostram a Figura 96 e a Figura 97.



.**Figura 96.** Histograma de Barras e Curva PDF da Fração Molar de CO_2 do Gás Natural Final.

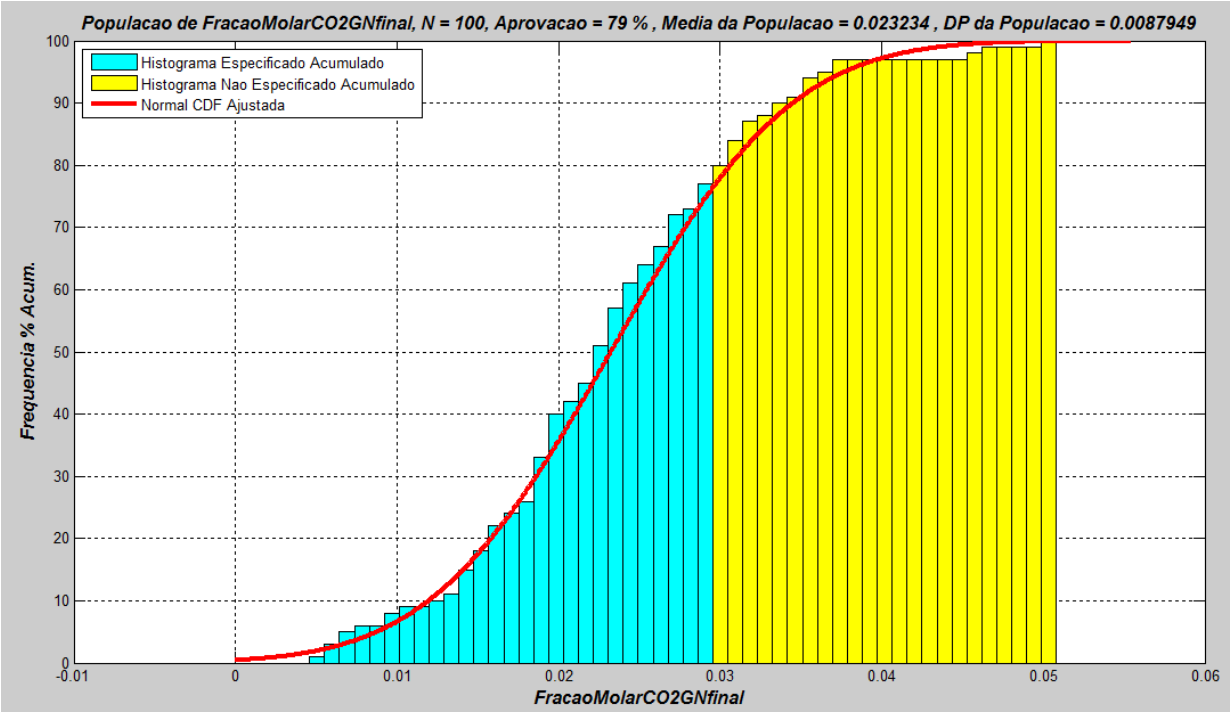


Figura 97. Histograma de Barras Acumulado e Curva CDF da Fração Molar de CO_2 do Gás Natural Final.

A Tabela 10 resume o impacto do aumento da área dos módulos de membranas nas demais variáveis do processo impactadas por esta mudança.

Tabela 10 – Impacto do Aumento da Área dos Módulos de Membranas nas Variáveis de Saída.

Variável	Unidade	Média Amostral Antes	Média Amostral Depois	Impacto
Fração Molar C1 GNfinal	-	0,9467	0,9519	Aumento da pureza
Vazão Molar GNfinal	kgmole/h	7536,67	7257,7	Diminuição da vazão
Potência Compressores CO2	KJ/h	5,88 x 107	6,15 x 107	Aumento do consumo de energia
Potência Trocadores CO2	KJ/h	7,83 x 107	8,13 x 107	Aumento do consumo de energia
Ponto de Orvalho Água GNfinal	°C	-53,9	-53,8	Variação mínima
Ponto de Orvalho Hidrocarbonetos GNfinal	°C	-24,8	-24,7	Variação mínima
Fração Molar CO2 CO2reinjeção	-	0,64812	0,63065	Diminuição da pureza
Vazão Molar CO2reinjeção	kgmole/h	2824,94	2947,64	Aumento da vazão

Ao analisar a Tabela 10, é possível constatar o binômio seletividade x capacidade de processamento do processo de separação de CO_2 por membranas, uma vez que o aumento da área aumentou a pureza do gás natural final, no entanto, diminuiu sua vazão.

O arquivo em formato MATLAB gerado por "***MCAnalysis***", para geração das curvas PDF e CDF, e histogramas de barras – simples e cumulativo – e estatísticas de atendimento a especificações da fração molar de CO_2 no gás natural final se encontra no Anexo 8.6.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A metodologia de Monte Carlo foi aplicada na administração de incertezas para avaliar o dimensionamento de um projeto de processamento *offshore* de gás natural através da ferramenta computacional APP-VB-XML-HYSYS-MATLAB ("***MCAnalysis***") desenvolvida para este propósito.

O projeto base atendeu a 100% dos casos amostrados de três especificações: WDP, HCDP e fração molar mínima de C1 no gás natural final. No entanto, para a última especificação, fração molar máxima de CO_2 no gás natural final, o projeto atendia a apenas 54,6%.

Como o CO_2 só é removido do gás natural através dos módulos de membrana, verificou-se que um pequeno aumento de 10% na área desses módulos fez com que o projeto passasse a atender a 79% dos casos com respeito à fração molar máxima de CO_2.

A ferramenta computacional APP-VB-XML-HYSYS-MATLAB ("***MCAnalysis***") atendeu aos objetivos da análise MMC proposta nesta Dissertação e possui grande aplicabilidade em projetos futuros.

Na área de processamento *offshore* de gás natural, cabe a realização de análises futuras para administrar outras incertezas que impactam no dimensionamento de projetos utilizando a ferramenta APP-VB-XML-HYSYS-MATLAB ("***MCAnalysis***").

No que diz respeito à metodologia de Monte Carlo, cabe o estudo de outras distribuições de variáveis de entrada, além da distribuição normal, sendo válida também a análise de dados históricos dessas variáveis.

Em relação à simulação de processos no software HYSYS, a ferramenta APP-VB-XML-HYSYS-MATLAB ("***MCAnalysis***") está funcional para ser utilizada para análise MMC de processos de outras áreas da Engenharia Química.

Cabe também a avaliação de inclusão de módulos de extração de dados de outras ferramentas CAE, como, por exemplo, ferramentas de CFD, pela ferramenta APP-VB-

XML-HYSYS-MATLAB (“***MCAnalysis***”) no padrão de saída de dados implementado para o HYSYS para que o mesmo módulo de geração de análise MMC seja utilizado.

No que diz respeito a melhorias da ferramenta APP-VB-XML-HYSYS-MATLAB (“***MCAnalysis***”)”, alguns pontos foram levantados durante o seu desenvolvimento. Como o arquivo de saída contendo os dados da simulação é de grande porte, cabe avaliar se a criação de um banco de dados para armazenar esses dados em substituição ao arquivo XML seria uma opção mais otimizada. Em relação aos arquivos de configuração de ambos os módulos da ferramenta, o nó *ImpactVariables*, pode ser eliminado, pois é possível buscar a variável pelo seu índice diretamente do nó *Variables*. Por fim, também é interessante avaliar a inclusão de funcionalidade para geração automática dos gráficos através da API do MATLAB.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I.A. Handbook of Mathematical Functions, Dover Publications, 1965.
- ANDRONOV, A. Monte-Carlo approximation for probability distribution of monotone Boolean function, Journal of Statistical Planning and Inference, v. 132, n. 1 – 2, p. 21 – 31, 2005.
- ANP. Resolução nº 16, DE 17.6.2008 – DOU 18.6.2008. Disponível em <http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2008/junho/ranp%2016%20-%202008.xml>.
- ARUNRAJ, N.S.; MANDAL, S.; MAITI, J. Modeling uncertainty in risk assessment: An integrated approach with fuzzy set theory and Monte Carlo simulation, Accident Analysis & Prevention, v. 55, p. 242 – 255, 2013.
- Aspen Technology, Inc. Aspen HYSYS Customization Guide, V 7.3, 2011.
- Aspen Technology, Inc. Aspen HYSYS User's Guide, V 7.1, 2009.
- BAHADORI, A.; VULTHALURU, H.B., Rapid estimation of equilibrium water dew point of natural gas in TEG dehydration systems, Journal of Natural Gas Science and Engineering, v. 1, p. 68 – 71, 2009.
- BAKER, R.W.; LOKHANDWALA, K. Natural Gas Processing with Membranes: An Overview, Ind. Eng. Chem. Res, v. 47, p. 2109 – 2121, 2008.
- BP Statistical Review of World Energy, 2013.
- CAMPBELL, J.M. Gas Conditioning and Processing, Campbell Petrolium Series, 7ª edição, 1984.
- DOMINGOS, E.C.F. Interoperabilidade entre Ambientes de Simulação e Projeto de Processos da Engenharia Química, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2010.
- DZOBO, O.; GAUNT, C.T.; HERMAN, R. Investigating the use of probability distribution functions in reliability-worth analysis of electric power systems, Electrical Power and Energy Systems v. 31, n. 1, p. 100 – 116, 2012.
- ECKSTEIN, J.; CHEN, C.-P.; JANICKA, J. Modeling of turbulent mixing in opposed jet configuration: One-dimensional Monte Carlo probability density function, Proceedings of the Combustion Institute, v. 28, n. 1, p. 141 – 148, 2000.
- GUIMARÃES, C.C.; MORALLES, M.; MARTINELLI, J.R; Monte Carlo simulation of liver cancer treatment with ^{166}Ho-loaded glass microspheres, Radiation Physics and Chemistry, v. 95, p. 185-187, 2014.

- HABIB, A.S.; SHUTT, A.L.; REGAN, P.H.; MATTHEWS, M.C.; ALSULAITI, H.; BRADLEY, D.A. Characterization of naturally occurring radioactive materials in Libyan oil pipe scale using a germanium detector and Monte Carlo simulation, Radiation Physics and Chemistry, v. 95, p. 352 – 355, 2014.
- HASTINGS, W.K. Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications, Biometrika, v. 57, n. 1, p. 97 – 109, 1970.
- JAQUES, S. Monte Carlo sampling of probability distributions: How to make the computer roll dice, NewsEtc, 1998. Disponível em <http://omlc.ogi.edu/news/sep98/montecarlosampling/>.
- KELLNER, M.I; MADACHY, R.J.; RAFFO, D.M. D. Software process simulation modeling: Why? What? How?, The Journal of Systems and Software, v. 46, n. 2 - 3, p. 91 - 105, 1999.
- LAGACHE, M.H.; UNGENER, P.; BOUTIN, A. Prediction of thermodynamic derivative properties of natural condensate gases at high pressure by Monte Carlo simulation, Fluid Phase Equilibria, v. 220, n. 2, 30, p. 211 – 223, 2004.
- LONATI, G.; ZANONI, F. Monte-Carlo human health risk assessment of mercury emissions from a MSW gasification plant, Waste Management, v. 33, n. 2, p. 347 – 355, 2013.
- MACHADO, P.B.; MONTEIRO, J.G.M.; MEDEIROS, J.L.; EPSOM, H.D.; ARAUJO, O.Q.F. Supersonic Separation in onshore natural gas dew point plant, Journal of Natural Gas Science and Engineering, v. 6, p. 43 – 49, 2012.
- MEDEIROS, J. L. Comunicação pessoal: User Unit Operation para módulo de membrana em HYSYS desenvolvido no laboratório H2CIN, 2013.
- Microsoft, Programação orientada a objetos no Visual Basic, 2008. Disponível em <http://msdn.microsoft.com/pt-br/library/b86b82w0(v=vs.90).aspx>.
- NETUSIL, M.; DITL, P. Comparison of three methods for natural gas dehydration, Journal of Natural Gas Chemistry, v. 20, p. 471 – 476, 2011.
- OLARU, M.; SANDRU. M.; PIRNEA, I.C. Monte Carlo Method Application for Environmental Risks Impact Assessment in Investment Projects, Procedia - Social and Behavioral Sciences, v. 109, p. 940 – 943, 2014.
- RAFFO, D.M.; KELLNER, M.I. Empirical analysis in software process simulation modeling, The Journal of Systems and Software, v. 53, n.1, p. 31 – 41, 2000.
- RATICK, S.; SCHWARZ, G. Monte Carlo Simulation, International Encyclopedia of Human Geography, p. 175 – 184, 2009.

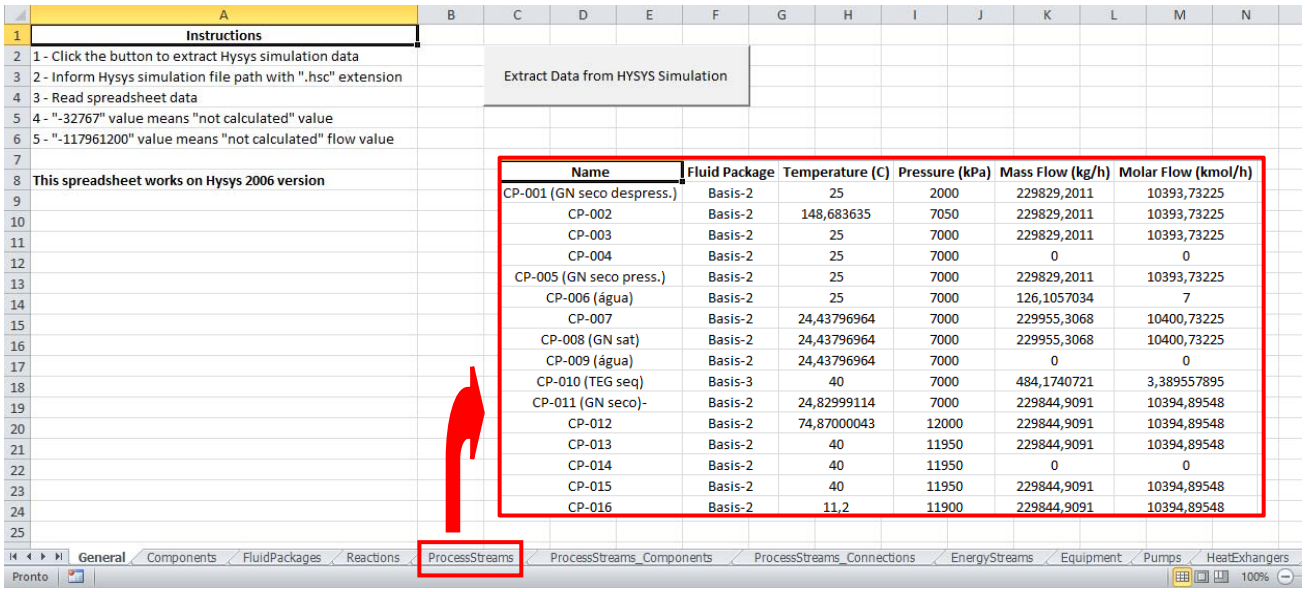
- SANT'ANNA, A.A. Simulação de Processamento de Gás Natural em Plataforma Off-Shore, Projeto Final de Curso, EQ/UFRJ, 2005.
- SANT'ANNA, A.A; MEDEIROS, J.L.; ARAÚJO, O.Q.F. Simulação de Processamento de Gás Natural em Plataforma *Off-shore*, 3° Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2005.
- SANTOS, W.G. Minicurso Processamento de Gás Natural, UFPETRO, Maio 2012.
- SCHNEIDER, R.; MARQUARDT, W. Information technology support in the chemical process design life cycle, Chemical Engineering Science, v.57, n. 10, p. 1763 – 1792, 2002.
- TAUT, C.; CORREA, C.; DEUTSCHMANN, O.; WARNATZ, J.; EINECKE, S.; SCHUTZ, C.; WOLFRUM, J. Three-dimensional modeling with Monte Carlo-probability density function methods and laser diagnostics of the combustion in a two-stroke engine, Proceedings of the Combustion Institute, v. 28, n. 1, p. 1153 – 1159, 2000.
- VAZ, C.E.M.; MAIA, J.L.P.M; SANTOS, W.G. Tecnologia da Indústria do Gás Natural, 1ª edição, Blucher, 2008.
- W3C. Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fifth Edition), 2008. Disponível em <http://www.w3.org/TR/REC-xml>.
- WEI, J. A parallel Monte Carlo method for population balance modeling of particulate processes using bookkeeping strategy, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications,, In Press, Uncorrected Proof, 2014.
- YEH, C.Y.; LEE, C.C; CHAO, T.C.; LIN, M.H.; LAI, P.A.; LIU, F.H.; TUNG, C.J. Application of the measurement-based Monte Carlo method in nasopharyngeal cancer patients for intensity modulated radiation therapy, Radiation Physics and Chemistry, v. 95, p. 240 – 242, 2014.
- YEO, Z.Y.; CHEW, T.L.; ZHU, P.; MOHAMED, A.R.; CHAI, S-P. Conventional processes and membrane technology for carbon dioxide removal from natural gas: A review, Journal of Natural Gas Chemistry, v.21, p. 282 – 298, 2012.
- ZHAO, H.; ZHENG, C. A population balance-Monte Carlo method for particle coagulation in spatially inhomogeneous systems, Computers & Fluids, v; 71, p. 196 – 207, 2013.

8. ANEXOS

8.1. Sumários de Componentes da Simulação Base do HYSYS

Este Anexo tem como objetivo complementar os dados da simulação do processamento offshore de gás natural descrita no Capítulo 3.1.5.

Os sumários apresentados abaixo foram extraídos através de uma arquivo de extração de dados desenvolvido no Excel, através de macros em VBA, mais um exemplo de ***Automation*** do HYSYS. Este arquivo foi um desenvolvimento específico para buscar dados de qualquer simulação de HYSYS e escrever no padrão definido para ele, através de abas.



Name	Fluid Package	Temperature (C)	Pressure (kPa)	Mass Flow (kg/h)	Molar Flow (kmol/h)
CP-001 (GN seco despress.)	Basis-2	25	2000	229829,2011	10393,73225
CP-002	Basis-2	148,683635	7050	229829,2011	10393,73225
CP-003	Basis-2	25	7000	229829,2011	10393,73225
CP-004	Basis-2	25	7000	0	0
CP-005 (GN seco press.)	Basis-2	25	7000	229829,2011	10393,73225
CP-006 (água)	Basis-2	25	7000	126,1057034	7
CP-007	Basis-2	24,43796964	7000	229955,3068	10400,73225
CP-008 (GN sat)	Basis-2	24,43796964	7000	229955,3068	10400,73225
CP-009 (água)	Basis-2	24,43796964	7000	0	0
CP-010 (TEG seq)	Basis-3	40	7000	484,1740721	3,389557895
CP-011 (GN seco)-	Basis-2	24,82999114	7000	229844,9091	10394,89548
CP-012	Basis-2	74,87000043	12000	229844,9091	10394,89548
CP-013	Basis-2	40	11950	229844,9091	10394,89548
CP-014	Basis-2	40	11950	0	0
CP-015	Basis-2	40	11950	229844,9091	10394,89548
CP-016	Basis-2	11,2	11900	229844,9091	10394,89548

→Sumário de Pacotes Termodinâmicos:

Name	Property Package	Component List	Property Package Name
Basis-1	Peng-Robinson	Component List - 1	pengrob
Basis-2	Peng-Robinson	Component List - 2	pengrob
Basis-3	Glycol Package	Component List - 2	glycolpkg

→Sumário de Correntes de Processo:

Name	Fluid Package	Temperature (C)	Pressure (kPa)	Mass Flow (kg/h)	Molar Flow (kmol/h)	Vapour / Phase Fraction	From Connection	To Connection	Classification
CP-001 (GN seco despress.)	Basis-2	25	2000	229829,2011	10393,73225	1	FeederBlock_CP-001 (GN seco despress.)	C-001	Inlet Process Stream
CP-002	Basis-2	148,683635	7050	229829,2011	10393,73225	1	C-001	E-001	Intermediate Process Stream

CP-003	Basis-2	25	7000	229829,2011	10393,73225	1	E-001	V-001	Intermediate Process Stream
CP-004	Basis-2	25	7000	0	0	0	V-001	ProductBlock_CP-004	Outlet Process Stream
CP-005 (GN seco press.)	Basis-2	25	7000	229829,2011	10393,73225	1	V-001	MIX-001	Intermediate Process Stream
CP-006 (água)	Basis-2	25	7000	126,1057034	7	0	FeederBlock_CP-006 (água)	MIX-001	Inlet Process Stream
CP-007	Basis-2	24,43796964	7000	229955,3068	10400,73225	1	MIX-001	V-002	Intermediate Process Stream
CP-008 (GN sat)	Basis-2	24,43796964	7000	229955,3068	10400,73225	1	V-002	T-001	Intermediate Process Stream
CP-009 (água)	Basis-2	24,43796964	7000	0	0	0	V-002	ProductBlock_CP-009 (água)	Outlet Process Stream
CP-010 (TEG seq)	Basis-3	40	7000	484,1740721	3,389557895	0	E-007	T-001	Intermediate Process Stream
CP-011 (GN seco)-	Basis-2	24,82999114	7000	229844,9091	10394,89548	1	T-001	C-002	Intermediate Process Stream
CP-012	Basis-2	74,87000043	12000	229844,9091	10394,89548	1	C-002	E-002	Intermediate Process Stream
CP-013	Basis-2	40	11950	229844,9091	10394,89548	1	E-002	V-003	Intermediate Process Stream
CP-014	Basis-2	40	11950	0	0	0	V-003	ProductBlock_CP-014	Outlet Process Stream
CP-015	Basis-2	40	11950	229844,9091	10394,89548	1	V-003	E-003	Intermediate Process Stream
CP-016	Basis-2	11,2	11900	229844,9091	10394,89548	1	E-003	VLV-001 (JT)	Intermediate Process Stream
CP-017	Basis-2	-33,55304656	4000	229844,9091	10394,89548	0,997886111	VLV-001 (JT)	V-004	Intermediate Process Stream
CP-018 (GN seco leve)	Basis-2	-33,97295574	3950	228577,7981	10372,59243	1	V-004	MIX-002	Intermediate Process Stream
CP-019	Basis-2	-33,9122451	3950	228803,7049	10380,16794	0,999991451	MIX-002	E-003	Intermediate Process Stream
CP-020 (LGN)	Basis-2	-33,97295574	3950	1267,11099	22,30305218	0	V-004	E-004	Intermediate Process Stream
CP-021	Basis-2	40	3950	1267,11099	22,30305218	0,339662664	E-004	V-005	Intermediate Process Stream
CP-022 (LGN)	Basis-2	40	3950	1041,204185	14,72753807	0	V-005	ProductBlock_CP-022 (LGN)	Outlet Process Stream
CP-023	Basis-2	40	3950	225,9068048	7,575514109	1	V-005	MIX-002	Intermediate Process Stream
CP-024 (GN seco leve)	Basis-2	3,672074224	3950	228803,7049	10380,16794	1	E-003	E-008	Intermediate Process Stream
CP-025 (TEG rico)	Basis-3	24,53486827	7000	594,5718016	9,226330001	0	T-001	E-005	Intermediate Process Stream
CP-026	Basis-3	85	400	594,5718016	9,226330001	0,004701186	E-005	V-006	Intermediate Process Stream
CP-027 (Flare)	Basis-3	85	400	1,868039645	0,043374694	1	V-006	ProductBlock_CP-027 (Flare)	Outlet Process Stream
CP-028 (TEG	Basis-3	85	400	592,703762	9,182955317	0	V-006	E-006	Intermediate Process

rico)									Stream
CP-029	Basis-3	140	400	592,703762	9,182955317	0,00325573	E-006	T-002	Intermediate Process Stream
CP-030 (gás retificador)	Basis-2	40	200	141,6910342	8,49627	1	FeederBlock_ CP-030 (gás retificador)	T-002	Inlet Process Stream
CP-031 (Flare)	Basis-3	111,9492826	200	250,907011	14,29423889	1	T-002	ProductBlock_ CP-031 (Flare)	Outlet Process Stream
CP-032 (TEG reg)	Basis-3	251,8645493	200	483,4877852	3,384986424	7,10673E-06	T-002	RCY-001	Intermediate Process Stream
CP-033 (TEG reg)	Basis-3	251,8803955	200	483,7462242	3,386708786	0	RCY-001	MIX-003	Intermediate Process Stream
CP-034 (TEG make up)	Basis-3	40	100	0,427847833	0,002849109	0	FeederBlock_ CP-034 (TEG make up)	MIX-003	Inlet Process Stream
CP-035 (TEG seq)	Basis-3	247,0952381	100	484,1740721	3,389557895	0,047975868	MIX-003	E-006	Intermediate Process Stream
CP-036	Basis-3	190,4811473	250	484,1740721	3,389557895	0	E-006	B-001	Intermediate Process Stream
CP-037	Basis-3	193,2912354	7050	484,1740721	3,389557895	0	B-001	E-007	Intermediate Process Stream
CP-038	Basis-2	35	3900	228803,7049	10380,16794	1	E-008	MB-001	Intermediate Process Stream
CP-039	Basis-2	29,3908691 4	3800	148660,0638	8156,103819	1	MB-001	MB-002	Intermediate Process Stream
CP-040	Basis-2	26,3908691 4	100	80143,64107	2224,06412	1	MB-001	MIX-004	Intermediate Process Stream
CP-041 (GN final)	Basis-2	27,5048828 1	3700	131453,394	7550,140418	1	MB-002	ProductBlock_ CP-041 (GN final)	Outlet Process Stream
CP-042	Basis-2	24,5048828 1	100	17206,6698	605,9634012	1	MB-002	MIX-004	Intermediate Process Stream
CP-043	Basis-2	25,9894567	100	97350,31087	2830,027522	1	MIX-004	C-003	Intermediate Process Stream
CP-044	Basis-2	137,3414602	320	97350,31087	2830,027522	1	C-003	E-009	Intermediate Process Stream
CP-045	Basis-2	35	270	97350,31087	2830,027522	1	E-009	V-007	Intermediate Process Stream
CP-046	Basis-2	35	270	97350,31087	2830,027522	1	V-007	C-004	Intermediate Process Stream
CP-047	Basis-2	35	270	0	0	0	V-007	ProductBlock_ CP-047	Outlet Process Stream
CP-048	Basis-2	148,8651657	864	97350,31087	2830,027522	1	C-004	E-010	Intermediate Process Stream
CP-049	Basis-2	35	814	97350,31087	2830,027522	1	E-010	V-008	Intermediate Process Stream
CP-050	Basis-2	35	814	97350,31087	2830,027522	1	V-008	C-005	Intermediate Process Stream
CP-051	Basis-2	35	814	0	0	0	V-008	ProductBlock_ CP-051	Outlet Process Stream
CP-052	Basis-2	149,873451	2604,8	97350,31087	2830,027522	1	C-005	E-011	Intermediate Process Stream
CP-053	Basis-2	35	2554,8	97350,31087	2830,027522	1	E-011	V-009	Intermediate Process

									Stream
CP-054	Basis-2	35	2554,8	97350,31087	2830,027522	1	V-009	C-006	Intermediate Process Stream
CP-055	Basis-2	35	2554,8	0	0	0	V-009	ProductBlock_CP-055	Outlet Process Stream
CP-056	Basis-2	151,9978875	8176,36	97350,31087	2830,027522	1	C-006	E-012	Intermediate Process Stream
CP-057	Basis-2	35	8126,36	97350,31087	2830,027522	1	E-012	V-010	Intermediate Process Stream
CP-058	Basis-2	35	8126,36	97350,31087	2830,027522	1	V-010	C-007	Intermediate Process Stream
CP-059	Basis-2	35	8126,36	0	0	0	V-010	ProductBlock_CP-059	Outlet Process Stream
CP-060	Basis-2	143,3741363	26004,352	97350,31087	2830,027522	1	C-007	E-013	Intermediate Process Stream
CP-061 (CO2 reinjeção)	Basis-2	35	25954,352	97350,31087	2830,027522	0	E-013	ProductBlock_CP-061 (CO2 reinjeção)	Outlet Process Stream

→Sumário de Correntes de Energia

Name	Heat Flow (kJ/h)	Type Name
CE-001	47382033,87	energystream
CE-002	59479686,87	energystream
CE-003	16544570	energystream
CE-004	19050761,96	energystream
CE-005	243585,8705	energystream
CE-006	101217,4879	energystream
CE-007	101217,4879	energystream
CE-008	311985,8931	energystream
CE-009	4386,219078	energystream
CE-010	210365,9898	energystream
CE-011	14031227,98	energystream
CE-012	12361129,34	energystream
CE-013	11539302,26	energystream
CE-014	12644542,43	energystream
CE-015	13107195,93	energystream
CE-016	12395648,39	energystream
CE-017	13950011,85	energystream
CE-018	11656865,91	energystream
CE-019	17606212,02	energystream
CE-020	9820959,263	energystream
CE-	22282953,05	energystream

021		

→Sumário de Equipamentos, Componentes de Tubulação e Operações Lógicas

Name	Classification	Classification Name	Type Name
B-001	3	Rotating Equipment	pumpop
C-001	3	Rotating Equipment	compressor
C-002	3	Rotating Equipment	compressor
C-003	3	Rotating Equipment	compressor
C-004	3	Rotating Equipment	compressor
C-005	3	Rotating Equipment	compressor
C-006	3	Rotating Equipment	compressor
C-007	3	Rotating Equipment	compressor
E-001	2	Heat Transfer Equipment	coolerop
E-002	2	Heat Transfer Equipment	coolerop
E-003	2	Heat Transfer Equipment	heatexop
E-004	2	Heat Transfer Equipment	heaterop
E-005	2	Heat Transfer Equipment	heaterop
E-006	2	Heat Transfer Equipment	heatexop
E-007	2	Heat Transfer Equipment	coolerop
E-008	2	Heat Transfer Equipment	heaterop
E-009	2	Heat Transfer Equipment	coolerop
E-010	2	Heat Transfer Equipment	coolerop
E-011	2	Heat Transfer Equipment	coolerop
E-012	2	Heat Transfer Equipment	coolerop
E-013	2	Heat Transfer Equipment	coolerop
MB-001	0	UserOpFilterType	
MB-002	0	UserOpFilterType	
MIX-001	4	Piping Equipment	mixerop
MIX-002	4	Piping Equipment	mixerop
MIX-003	4	Piping Equipment	mixerop
MIX-004	4	Piping Equipment	mixerop
RCY-001	10	Logical Operations	recycle
SET-001	10	Logical Operations	setop
T-001	9	Prebuilt Columns	absorber
T-002	9	Prebuilt Columns	reboiledabsorber
V-001	1	Vessels	flashtank
V-002	1	Vessels	flashtank
V-003	1	Vessels	flashtank
V-004	1	Vessels	flashtank
V-005	1	Vessels	flashtank
V-006	1	Vessels	flashtank
V-007	1	Vessels	flashtank
V-008	1	Vessels	flashtank
V-009	1	Vessels	flashtank

V-010	1	Vessels	flashtank
VLV-001 (JT)	4	Piping Equipment	valveop

8.2. Arquivo XML de Parâmetros de Configuração

O arquivo XML contendo os parâmetros de configuração das variáveis de entrada a serem alteradas na simulação do software HYSYS se encontra neste Anexo.

```
<?xml version = '1.0'?>
<Variables>
    <Variable>
        <Variable_Name>Fracao Molar CO2</Variable_Name>
        <Variable_Type>Monte_Carlo_Direct</Variable_Type>
        <Attribute>
            <Attribute_Name>ComponentMolarFraction</Attribute_Name>
            <Attribute_Type>RealFlexVariable</Attribute_Type>
            <Attribute_Index>3</Attribute_Index>
            <Attribute_Unit>NA</Attribute_Unit>
            <MinimumCondition>
                <MinimumCondition_Value>0.10</MinimumCondition_Value>
                <MinimumCondition_Unit>NA</MinimumCondition_Unit>
            </MinimumCondition>
            <MaximumCondition>
                <MaximumCondition_Value>0.30</MaximumCondition_Value>
                <MaximumCondition_Unit>NA</MaximumCondition_Unit>
            </MaximumCondition>
        </Attribute>
        <Distribution>
            <Distribution_Type>Normal</Distribution_Type>
            <Distribution_Mean>0.20</Distribution_Mean>
            <Distribution_SD>0.03</Distribution_SD>
            <Distribution_Unit>NA</Distribution_Unit>
        </Distribution>
        <Object>
            <Object_Name>CP-001 (GN seco despress.)</Object_Name>
            <Object_Class>MaterialStreams</Object_Class>
        </Object>
    </Variable>
    <Variable>
        <Variable_Name>Vazao GN</Variable_Name>
        <Variable_Type>Monte_Carlo_Indirect</Variable_Type>
```

<Attribute>
<MinimumCondition>
<MinimumCondition_Value>3</MinimumCondition_Value>
<MinimumCondition_Unit>MMsm3/d</MinimumCondition_Unit>
</MinimumCondition>
<MaximumCondition>
<MaximumCondition_Value>9</MaximumCondition_Value>
<MaximumCondition_Unit>MMsm3/d</MaximumCondition_Unit>
</MaximumCondition>
</Attribute>
<Distribution>
<Distribution_Type>Normal</Distribution_Type>
<Distribution_Mean>6</Distribution_Mean>
<Distribution_SD>1</Distribution_SD>
<Distribution_Unit>MMsm3/d</Distribution_Unit>
</Distribution>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Vazao Molar GN</Variable_Name>
<Variable_Type>Expression</Variable_Type>
<Object>
<Object_Name>CP-001 (GN seco despress.)</Object_Name>
<Object_Class>MaterialStreams</Object_Class>
</Object>
<Attribute>
<Attribute_Name>MolarFlow</Attribute_Name>
<Attribute_Type>RealVariable</Attribute_Type>
<Attribute_Index>NA</Attribute_Index>
<Attribute_Unit>kgmole/h</Attribute_Unit>
</Attribute>
<ImpactVariables>
<Variable_Index>1</Variable_Index>
</ImpactVariables>
<Expressions>
<Expression>
<Operator>Multiply</Operator>
<Parameter1>1732.28871</Parameter1>
<Parameter2>Variable_1</Parameter2>
</Expression>
</Expressions>
</Variable>
<Variable>

<Variable_Name>Fracao Molar C1</Variable_Name>
<Variable_Type>Expression</Variable_Type>
<Object>
<Object_Name>CP-001 (GN seco despress.)</Object_Name>
<Object_Class>MaterialStreams</Object_Class>
</Object>
<Attribute>
<Attribute_Name>ComponentMolarFraction</Attribute_Name>
<Attribute_Type>RealFlexVariable</Attribute_Type>
<Attribute_Index>0</Attribute_Index>
<Attribute_Unit>NA</Attribute_Unit>
</Attribute>
<ImpactVariables>
<Variable_Index>0</Variable_Index>
</ImpactVariables>
<Expressions>
<Expression>
<Operator>Deduct</Operator>
<Parameter1>1</Parameter1>
<Parameter2>Variable_0</Parameter2>
</Expression>
<Expression>
<Operator>Multiply</Operator>
<Parameter1>0.973528472</Parameter1>
<Parameter2>Expression_0</Parameter2>
</Expression>
</Expressions>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Fracao Molar C2</Variable_Name>
<Variable_Type>Expression</Variable_Type>
<Object>
<Object_Name>CP-001 (GN seco despress.)</Object_Name>
<Object_Class>MaterialStreams</Object_Class>
</Object>
<Attribute>
<Attribute_Name>ComponentMolarFraction</Attribute_Name>
<Attribute_Type>RealFlexVariable</Attribute_Type>
<Attribute_Index>1</Attribute_Index>
<Attribute_Unit>NA</Attribute_Unit>
</Attribute>
<ImpactVariables>

<Variable_Index>0</Variable_Index>
</ImpactVariables>
<Expressions>
<Expression>
<Operator>Deduct</Operator>
<Parameter1>1</Parameter1>
<Parameter2>Variable_0</Parameter2>
</Expression>
<Expression>
<Operator>Multiply</Operator>
<Parameter1>0.014965326</Parameter1>
<Parameter2>Expression_0</Parameter2>
</Expression>
</Expressions>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Fracao Molar C3</Variable_Name>
<Variable_Type>Expression</Variable_Type>
<Object>
<Object_Name>CP-001 (GN seco despress.)</Object_Name>
<Object_Class>MaterialStreams</Object_Class>
</Object>
<Attribute>
<Attribute_Name>ComponentMolarFraction</Attribute_Name>
<Attribute_Type>RealFlexVariable</Attribute_Type>
<Attribute_Index>1</Attribute_Index>
<Attribute_Unit>NA</Attribute_Unit>
</Attribute>
<ImpactVariables>
<Variable_Index>0</Variable_Index>
</ImpactVariables>
<Expressions>
<Expression>
<Operator>Deduct</Operator>
<Parameter1>1</Parameter1>
<Parameter2>Variable_0</Parameter2>
</Expression>
<Expression>
<Operator>Multiply</Operator>
<Parameter1>0.004433684</Parameter1>
<Parameter2>Expression_0</Parameter2>
</Expression>

```
        </Expressions>
</Variable>
<Variable>
        <Variable_Name>Fracao Molar iC4</Variable_Name>
        <Variable_Type>Expression</Variable_Type>
        <Object>
                <Object_Name>CP-001 (GN seco despress.)</Object_Name>
                <Object_Class>MaterialStreams</Object_Class>
        </Object>
        <Attribute>
                <Attribute_Name>ComponentMolarFraction</Attribute_Name>
                <Attribute_Type>RealFlexVariable</Attribute_Type>
                <Attribute_Index>1</Attribute_Index>
                <Attribute_Unit>NA</Attribute_Unit>
        </Attribute>
        <ImpactVariables>
                <Variable_Index>0</Variable_Index>
        </ImpactVariables>
        <Expressions>
                <Expression>
                        <Operator>Deduct</Operator>
                        <Parameter1>1</Parameter1>
                        <Parameter2>Variable_0</Parameter2>
                </Expression>
                <Expression>
                        <Operator>Multiply</Operator>
                        <Parameter1>0.001124747</Parameter1>
                        <Parameter2>Expression_0</Parameter2>
                </Expression>
        </Expressions>
</Variable>
<Variable>
        <Variable_Name>Fracao Molar nC4</Variable_Name>
        <Variable_Type>Expression</Variable_Type>
        <Object>
                <Object_Name>CP-001 (GN seco despress.)</Object_Name>
                <Object_Class>MaterialStreams</Object_Class>
        </Object>
        <Attribute>
                <Attribute_Name>ComponentMolarFraction</Attribute_Name>
                <Attribute_Type>RealFlexVariable</Attribute_Type>
                <Attribute_Index>1</Attribute_Index>
```

<Attribute_Unit>NA</Attribute_Unit>
</Attribute>
<ImpactVariables>
<Variable_Index>0</Variable_Index>
</ImpactVariables>
<Expressions>
<Expression>
<Operator>Deduct</Operator>
<Parameter1>1</Parameter1>
<Parameter2>Variable_0</Parameter2>
</Expression>
<Expression>
<Operator>Multiply</Operator>
<Parameter1>0.000986659</Parameter1>
<Parameter2>Expression_0</Parameter2>
</Expression>
</Expressions>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Fracao Molar iC5</Variable_Name>
<Variable_Type>Expression</Variable_Type>
<Object>
<Object_Name>CP-001 (GN seco despress.)</Object_Name>
<Object_Class>MaterialStreams</Object_Class>
</Object>
<Attribute>
<Attribute_Name>ComponentMolarFraction</Attribute_Name>
<Attribute_Type>RealFlexVariable</Attribute_Type>
<Attribute_Index>1</Attribute_Index>
<Attribute_Unit>NA</Attribute_Unit>
</Attribute>
<ImpactVariables>
<Variable_Index>0</Variable_Index>
</ImpactVariables>
<Expressions>
<Expression>
<Operator>Deduct</Operator>
<Parameter1>1</Parameter1>
<Parameter2>Variable_0</Parameter2>
</Expression>
<Expression>
<Operator>Multiply</Operator>

<Parameter1>0.000482159</Parameter1>
<Parameter2>Expression_0</Parameter2>
</Expression>
</Expressions>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Fracao Molar nC5</Variable_Name>
<Variable_Type>Expression</Variable_Type>
<Object>
<Object_Name>CP-001 (GN seco despress.)</Object_Name>
<Object_Class>MaterialStreams</Object_Class>
</Object>
<Attribute>
<Attribute_Name>ComponentMolarFraction</Attribute_Name>
<Attribute_Type>RealFlexVariable</Attribute_Type>
<Attribute_Index>1</Attribute_Index>
<Attribute_Unit>NA</Attribute_Unit>
</Attribute>
<ImpactVariables>
<Variable_Index>0</Variable_Index>
</ImpactVariables>
<Expressions>
<Expression>
<Operator>Deduct</Operator>
<Parameter1>1</Parameter1>
<Parameter2>Variable_0</Parameter2>
</Expression>
<Expression>
<Operator>Multiply</Operator>
<Parameter1>0.000261074</Parameter1>
<Parameter2>Expression_0</Parameter2>
</Expression>
</Expressions>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Fracao Molar nC6</Variable_Name>
<Variable_Type>Expression</Variable_Type>
<Object>
<Object_Name>CP-001 (GN seco despress.)</Object_Name>
<Object_Class>MaterialStreams</Object_Class>
</Object>
<Attribute>

```
                <Attribute_Name>ComponentMolarFraction</Attribute_Name>
                <Attribute_Type>RealFlexVariable</Attribute_Type>
                <Attribute_Index>1</Attribute_Index>
                <Attribute_Unit>NA</Attribute_Unit>
        </Attribute>
        <ImpactVariables>
                <Variable_Index>0</Variable_Index>
        </ImpactVariables>
        <Expressions>
                <Expression>
                        <Operator>Deduct</Operator>
                        <Parameter1>1</Parameter1>
                        <Parameter2>Variable_0</Parameter2>
                </Expression>
                <Expression>
                        <Operator>Multiply</Operator>
                        <Parameter1>0.000302779</Parameter1>
                        <Parameter2>Expression_0</Parameter2>
                </Expression>
        </Expressions>
</Variable>
<Variable>
        <Variable_Name>Fracao Molar nC7</Variable_Name>
        <Variable_Type>Expression</Variable_Type>
        <Object>
                <Object_Name>CP-001 (GN seco despress.)</Object_Name>
                <Object_Class>MaterialStreams</Object_Class>
        </Object>
        <Attribute>
                <Attribute_Name>ComponentMolarFraction</Attribute_Name>
                <Attribute_Type>RealFlexVariable</Attribute_Type>
                <Attribute_Index>1</Attribute_Index>
                <Attribute_Unit>NA</Attribute_Unit>
        </Attribute>
        <ImpactVariables>
                <Variable_Index>0</Variable_Index>
        </ImpactVariables>
        <Expressions>
                <Expression>
                        <Operator>Deduct</Operator>
                        <Parameter1>1</Parameter1>
                        <Parameter2>Variable_0</Parameter2>
```

```
            </Expression>
            <Expression>
                <Operator>Multiply</Operator>
                <Parameter1>0.000459251</Parameter1>
                <Parameter2>Expression_0</Parameter2>
            </Expression>
        </Expressions>
</Variable>
<Variable>
        <Variable_Name>Fracao Molar nC8</Variable_Name>
        <Variable_Type>Expression</Variable_Type>
        <Object>
            <Object_Name>CP-001 (GN seco despress.)</Object_Name>
            <Object_Class>MaterialStreams</Object_Class>
        </Object>
        <Attribute>
            <Attribute_Name>ComponentMolarFraction</Attribute_Name>
            <Attribute_Type>RealFlexVariable</Attribute_Type>
            <Attribute_Index>1</Attribute_Index>
            <Attribute_Unit>NA</Attribute_Unit>
        </Attribute>
        <ImpactVariables>
            <Variable_Index>0</Variable_Index>
        </ImpactVariables>
        <Expressions>
            <Expression>
                <Operator>Deduct</Operator>
                <Parameter1>1</Parameter1>
                <Parameter2>Variable_0</Parameter2>
            </Expression>
            <Expression>
                <Operator>Multiply</Operator>
                <Parameter1>0.000297548</Parameter1>
                <Parameter2>Expression_0</Parameter2>
            </Expression>
        </Expressions>
</Variable>
<Variable>
        <Variable_Name>Fracao Molar nC9</Variable_Name>
        <Variable_Type>Expression</Variable_Type>
        <Object>
            <Object_Name>CP-001 (GN seco despress.)</Object_Name>
```

```
            <Object_Class>MaterialStreams</Object_Class>
        </Object>
        <Attribute>
            <Attribute_Name>ComponentMolarFraction</Attribute_Name>
            <Attribute_Type>RealFlexVariable</Attribute_Type>
            <Attribute_Index>1</Attribute_Index>
            <Attribute_Unit>NA</Attribute_Unit>
        </Attribute>
        <ImpactVariables>
            <Variable_Index>0</Variable_Index>
        </ImpactVariables>
        <Expressions>
            <Expression>
                <Operator>Deduct</Operator>
                <Parameter1>1</Parameter1>
                <Parameter2>Variable_0</Parameter2>
            </Expression>
            <Expression>
                <Operator>Multiply</Operator>
                <Parameter1>0.0000287085</Parameter1>
                <Parameter2>Expression_0</Parameter2>
            </Expression>
        </Expressions>
</Variable>
<Variable>
        <Variable_Name>Fracao Molar N2</Variable_Name>
        <Variable_Type>Expression</Variable_Type>
        <Object>
            <Object_Name>CP-001 (GN seco despress.)</Object_Name>
            <Object_Class>MaterialStreams</Object_Class>
        </Object>
        <Attribute>
            <Attribute_Name>ComponentMolarFraction</Attribute_Name>
            <Attribute_Type>RealFlexVariable</Attribute_Type>
            <Attribute_Index>1</Attribute_Index>
            <Attribute_Unit>NA</Attribute_Unit>
        </Attribute>
        <ImpactVariables>
            <Variable_Index>0</Variable_Index>
        </ImpactVariables>
        <Expressions>
            <Expression>
```

```
                    <Operator>Deduct</Operator>
                    <Parameter1>1</Parameter1>
                    <Parameter2>Variable_0</Parameter2>
                </Expression>
                <Expression>
                    <Operator>Multiply</Operator>
                    <Parameter1>0.003091956</Parameter1>
                    <Parameter2>Expression_0</Parameter2>
                </Expression>
            </Expressions>
        </Variable>
</Variables>
```

8.3. Arquivo Matlab para Geração de Curva PDF e Histograma de Dados de Entrada

O arquivo em formato MATLAB gerado pela ferramenta para geração da curva PDF e histograma de barra da variável de Monte Carlo vazão do gás natural do processo, advindo do separador trifásico da plataforma, se encontra neste anexo.

```
function [] = VazaoGN
%Limpar variaveis e tela
clc
clear all

%Quantidade de rodadas(populacao)
NumRuns = 1000;

%Media
MU = 6;

%Desvio Padrao
SIGMA = 1;

%Vetor da populacao da distribuicao normal
Distr = [ 3.92377130222518 4.59623672556974 5.24168047302829 7.16888117284991
4.23611026992255 7.63481507354675 4.02425583566601 6.60869130298333 6.20265456274752
5.72038248133148 8.10105095215174 5.58101285417952 5.04410305792462 6.99518852440937
7.01262656243595 5.28433017833679 6.48704211043972 5.42975854576772 4.9003553517542
6.13388713352574 3.89610210722799 6.84982255530244 7.26893139392093 6.62122561290296
5.63945040858839 6.32692792641181 5.63733312842314 5.85427138102349 4.54437293396135
4.56265978177943 5.51183022162221 7.11143482133184 5.57910925874974 5.82975471202847
```

7.32933638614348 6.0582268254507 7.59470494003989 5.14122297382825 7.51932760846489
5.48052690255139 8.25279578672185 7.75151170425687 6.07944371340477 5.70186741336169
7.06105417324905 5.22237214038211 6.26938302635564 6.03754725007111 3.94215563439417
5.42470877510399 4.12096502298444 7.35369045260529 5.37754555987273 5.79909736525999
5.38184177060102 5.20131444327899 5.0600976156164 5.92031207638532 6.09557979085836
5.75199666278694 6.25562194160894 6.191156551598 6.43454096147648 6.04800316077197
4.67199126054298 4.82040053924485 2.95055771386297 6.57291276787634 7.43187853718434
5.59347807449202 5.42530373994363 6.03706118375569 5.57965332676683 6.91106008099503
6.15561856594004 4.40325343152378 5.45592879562123 6.07993214197208 7.09575216559297
4.9996157144727 4.10130780725478 6.78250623716709 5.8175694177281 6.76827807560872
4.34513195336206 5.71062590874393 6.29916483749137 7.28495086128482 5.10421362236399
6.549914095208 5.7676847873271 5.9703814518267 6.24622829900974 6.1159295014261
6.35078219717827 5.78706752907289 5.47678875877867 3.89035178886642 5.49140596993899
6.67253348384727 5.21993557217087 7.13605551128177 6.19340347252261 6.44718390259797
9.38545950502069 6.01969098605699 6.22701824574412 5.81632400717339 6.83543268482093
5.23688358099482 7.31617464625598 6.20992132507142 6.12281037092881 5.84190567575876
5.69489206018251 6.83396780249131 5.18956079528847 7.14220291032929 6.03978598215631
6.49891908468341 5.95686138677762 4.71939790678675 6.13314795919951 5.25087636207414
7.40525190935112 6.62460748052658 7.28495086128482 6.60808268479043 5.15868749222756
5.18237557899949 6.65794397168177 5.41784972795453 5.44275165535401 4.85882498535058
7.48452949427826 4.97048287780033 5.25291016423175 6.50062245727216 6.76862300834114
6.07602561709757 6.62337676681282 5.33446424568579 4.78787056851424 7.6912210215503
6.80579400107481 6.71599983578183 7.4389094139768 5.23241148012917 5.25223261918841
6.918985903748 5.25324879121575 5.7704604196461 5.99145112979269 6.12945365827566
5.55446990045989 4.86649187759414 5.58128464974717 5.77600491094911 6.64257657486775
5.37477675660796 6.13857104607565 7.00212292088647 5.32011038099896 6.28218179317906
5.88775325768649 6.35896290536576 5.63574388675066 5.942503818681 5.98139435645987
5.31561217568712 6.22979181651235 5.98357811618228 4.74970956368634 7.53751388130416
7.62505356539367 5.33763277501797 8.15219663612006 6.2237432787391 5.78857341401973
5.03746147774928 6.83360189654478 6.5043189108991 6.06188096825072 5.64394320338881
7.93663527930844 5.74183438762684 6.59084380122866 6.45215396969559 6.78285549714529
6.8838109695458 6.83140909313021 6.82594666802698 7.5668600508797 6.09044146408439
7.84357455205777 7.16622478185602 3.52359696662363 5.95880654796778 6.02345969894894
5.03621088767175 5.91640359419324 5.99303734094148 6.5382496954853 7.95887688935848
5.32619017350478 6.55313693372743 5.53201981522332 6.1154383311218 6.23433529299052
4.64354825777637 4.92343909784511 6.48310093894382 8.44191363129831 6.23155799576072
5.86488067398411 7.00125318080254 5.58318619663334 7.12944921884042 6.33450462230773
4.52885119502568 7.29752647621472 6.3040734126542 6.34053030288778 6.31028661840827
5.81956128634639 6.75456434188857 6.01229791038948 6.04167970788667 7.84357455205777
4.5665657906248 5.32331382125998 6.01326815335757 4.6941760767565 5.38306686024034
6.46714383568738 5.64183003016502 8.14585405484494 6.10856629834108 4.86087676787388
5.38612495821033 4.67924748981523 5.15425606233934 4.70310770687124 6.54845134772039

6.4859151640659 4.85933843121653 6.844634331323 5.64526296509657 4.94820711026079
4.88060862682931 6.14597561797358 4.89300655724034 6.81474464756618 5.96876995294776
5.33382962625045 6.79479525317057 6.85802786782054 4.70753092097373 6.13314795919951
5.8818597087663 5.25899070361481 6.64851459625669 6.17844780710207 6.07773446873645
6.94030913821196 6.20040223302749 6.26606444745984 6.60140481565566 7.25684967579213
4.73410823806092 7.05409876996808 6.62122561290296 6.69310775990428 5.80909302695348
7.93270184267549 6.5738042514104 6.09680379343328 7.34547425695099 7.41880698891732
5.53146203637394 7.84520646370244 5.16968562261287 5.81557657777074 7.00125318080254
6.00854887020731 4.86394448871823 6.4935361306219 6.23206278811283 3.96716955414486
7.16410622827756 5.99072431829337 7.22177088784377 8.20305988263189 6.40058680000019
4.34852503616884 5.58101285417952 6.17099031852548 6.03560311462766 7.11292071070097
4.84952519844064 6.00612599419025 4.63938477598643 5.87153105119516 4.36079099829201
5.36860412410131 6.85429016468377 5.64499907233279 5.82030798854836 6.0184801083742
6.02622894667001 5.38978601953111 7.19486260504919 5.03579364956539 5.46465315504317
5.94372142466732 4.15642544794223 5.6878984419404 6.55079239592793 4.57661011953488
6.56196044525764 7.13605551128177 3.90458782799641 6.55401703999861 3.98153636475451
6.13536579995776 7.73545214156511 6.65259252894825 4.80458655365375 5.70831018201092
6.36425611324934 5.04451659152151 4.14986525502411 4.35524923747443 6.86554399557472
6.81762442100051 7.20316785273693 6.61969108687419 5.71242570349051 6.24546786959549
6.36002057507698 6.6741291074505 5.54286282103685 4.92106434649669 6.0120553593948
6.31547550555464 6.23711490232439 6.6270721618842 6.50659763579285 5.29156827231311
3.92910226667544 7.64475076252557 6.98830716256747 5.96634067919158 5.04037299463037
5.29549861045566 5.97338419060595 5.64842736630111 5.83074788602458 5.96439688537234
5.46668204828494 4.53461505366782 5.36116045258911 4.39708424190678 6.8636598248655
5.65079788423976 5.31109816242176 6.99908252151172 5.59725692280373 5.9490769436467
6.09582457293945 5.45622037582485 8.22527226470737 4.87408543376185 5.80534767954269
7.68880075836191 6.16776277940547 7.14581114804196 5.26033772332264 5.72703896813438
7.64031293326923 5.26771935462634 4.44276824424984 7.1001325131356 5.67124532181482
6.47384541086031 5.51886636476136 6.09460075422057 7.14529467101388 6.21871088538842
5.6518506877078 6.10243721987703 5.64737303889397 7.18719267703792 5.65106112882711
6.20791527414075 6.03147295139032 5.41545659038001 5.5275527922521 5.16199890420666
5.85007067470313 6.62276181499143 5.88333366405598 5.40524243239138 6.35711314343865
6.58604107585508 7.76249971170261 6.58994210079794 4.58347218244119 5.18165444145257
6.28423487082617 6.15215472802802 4.96598322265158 4.36518492645325 5.97570809884561
4.57430625535139 3.80761683048769 5.6930806721689 6.44745967605731 4.91868280193666
4.440855277791 6.37434720995924 7.75973082065369 6.50545789206547 4.8998674868644
8.63727697939392 7.38906216811924 4.75914524508493 6.67317149908257 6.76965842726295
5.8791564558192 5.61498105744453 6.18641724282862 4.19557885753725 7.556277618607
5.24577644159291 6.69278373317114 6.75082115556081 5.30006844383317 6.21971678657261
6.56255046801989 6.07675793430708 6.02283904898191 6.47552468504972 7.83710008400295
6.64632387853846 5.86759110980714 5.5359195154512 5.77499748651193 5.47477240063881
6.18193252441701 5.13143412890061 6.11101967315126 5.13822090693545 4.96508048657806

6.61815822939898 6.72162368606112 6.51689007714444 4.98207456781979 6.36452109412573
6.81151397572948 7.07846016147886 7.82127286739247 5.43833448157581 6.62030469663985
5.54839890530977 8.08708791703317 4.82952058786887 4.74852140624631 5.54646313236222
5.50136464693918 5.28400016421817 4.98869320570875 4.72862752273372 5.7676847873271
6.04148040793329 5.14384266441139 5.43538267166134 6.58095513997262 5.68712022584762
6.12551590888569 6.27987384305276 6.46714383568738 6.02622894667001 5.25595432697107
5.42113404918865 6.65510818917872 5.84784527197198 7.17208097706511 5.22237214038211
5.84561881489183 4.5230329733252 6.35051877706324 6.09533501796201 6.75490522453195
6.9900225944997 6.14251876954476 5.31625573941344 7.55058526376073 6.38154495237006
6.68987120293513 5.60022123341365 5.26235540815045 4.72984911167823 8.22909308348606
5.73928861421588 4.29277586365742 5.98721697595445 6.72527647697597 6.2852619662101
6.14474074850511 6.00769008849456 7.90604359001225 6.70254084931344 4.77134684001869
5.16126392930907 5.14272074965433 5.99618917081654 4.52470094169415 6.0296185481733
6.0509230563533 6.11838598774819 5.26000111096235 7.1546437290495 7.11540328288898
5.32778540688602 6.09631416472027 6.15240205985069 5.51239414593999 6.02904413404913
7.33199947726072 7.54682085167054 5.57556921585321 4.62317826450576 6.15166010341522
5.38061561786567 5.85254212313804 6.23736770964966 5.96142434213191 6.88304324572546
5.31238950576487 5.50419940139774 6.28423487082617 5.42916532597503 6.25282630744037
7.18230264359605 4.68382535374402 7.08466287509496 5.95418618117599 6.23863203689709
6.41328707631268 4.78278189405317 5.11311226981889 5.93763169482607 4.95918963174944
5.26235540815045 4.88010872231902 5.58372916814863 5.23825614335762 6.64288845612788
6.83689958751458 5.93373197623166 5.17840337054314 5.41245974592454 6.49297047428351
6.26989390513917 5.25426409118152 7.23618247111048 5.2296507751236 6.94848109873526
6.63635384956307 6.10513325733409 7.90789916205876 5.3194687401902 5.44979319233155
5.39374162330593 7.41048938244694 7.51309120449211 5.45709479617572 8.10964821113358
5.04037299463037 6.40598166972834 4.89448163142939 6.39870187071743 6.95094654533707
6.86554399557472 6.71007303862099 6.99131130711676 7.45886269930495 5.72448058235891
4.96417680910981 4.82952058786887 5.82900968147452 6.58065650604422 3.87262887378436
6.67062130538571 4.82094002920487 5.73826971141817 6.08237477714314 8.34366237047466
6.43700808341592 5.13067726695313 6.40463164445137 6.240149871611 6.98275431257984
4.91053401128555 4.8974237808976 7.46702628701464 5.18381641900107 7.09381283342515
5.46784027572279 5.11388234254885 4.40631314000748 5.28168758270046 6.23029634510247
4.99787707911353 5.63812733673162 5.97812955331151 5.82030798854836 7.11192981446841
6.93787122085608 5.66941723598708 7.7380947636041 6.87615983793908 6.50716779442979
6.34053030288778 5.03829427005559 5.35273767665024 5.27903928466635 6.04244863818427
5.03203002655992 6.09680379343328 5.78480752255125 5.47650085870951 5.527273238079
7.88787123627368 2.90755864704709 5.96069814540969 6.84352589350222 6.54174005558241
6.48760585406001 6.9225737054 6.38394943416188 4.53706893771766 4.7759421581123
7.69609442482537 4.53543409516281 5.21923844883457 4.95142491151245 7.05780122312661
5.8796480535084 6.18616796130612 7.7380947636041 6.37594469030171 5.03412281682341
5.64816382864915 5.24781906567319 6.95507005758375 7.19431216560872 5.23447767711879
7.79546083132215 7.09429723719036 6.53854026877082 6.4282501757938 6.55636641556272

6.51345225834073 6.68213675868331 6.65920625718912 7.3058239232435 6.28834549562044
4.99526276645278 6.90046088368066 6.43125630194722 6.41111980655775 5.14122297382825
3.46919669254852 6.40382204923079 7.23909913588144 6.56166551842419 6.61295889458803
6.18891091182813 7.56783170967435 4.84848504976932 5.64974461373244 4.59400248287233
6.08677362824062 6.17745271171202 6.53854026877082 4.95736894077535 7.59982279758187
6.67700616671019 5.04699396463683 6.20591031557235 6.24977936515901 6.6270721618842
6.87235579182348 4.88210647755556 8.02082664910258 5.61042976174753 5.74081633175157
5.19669915975 3.94215563439417 6.88650262006594 5.67228934278486 8.47640303337637
5.29451718646786 5.18561478885518 6.42633956248092 6.37514580698939 6.73194619179229
5.59941319999981 4.96598322265158 7.08802212083611 5.43005506903171 6.81942816472043
6.27500756138245 6.08824052714167 6.55607255012187 5.0841921619709 5.84339129082809
4.98118831846071 6.11519276173252 5.6088211294566 6.93341783817962 4.8241690019786
7.17208097706511 5.51886636476136 5.48854988537949 5.10421362236399 4.43701040529063
5.88210539459625 4.94497712720724 4.1970832856724 6.01969098605699 6.06895015789451
6.33084402852521 7.65373469488702 5.83025132754952 6.01872228782354 6.41654229945069
5.76970365489753 8.25688333353946 5.33287712346199 7.36620738305907 5.96415388728468
5.80634678992972 6.27372831290358 5.98770208961052 7.39857989617301 6.02758708110573
6.26504408555226 7.24732856324591 6.37647743859126 5.24713858589808 5.57638670468735
5.1509201928026 6.43125630194722 8.14271772349093 5.38184177060102 4.80293161094707
7.35231407326572 7.22006030901094 6.00744760843753 6.25003316464224 5.68504384791399
5.21294493826881 4.82898710330788 5.7712170158119 6.50916486078802 5.09484243854869
6.37834306541343 5.00696754351047 5.36984084482236 5.98891480604586 4.21769052065371
5.01852231369684 5.62990716993149 5.79559269232086 5.74005256826229 6.46491543713578
5.44275165535401 6.82885649648228 5.67307207358819 6.29271964942146 5.85575311166026
6.01545143223303 5.94615614023976 6.85242633609838 5.14309485594743 5.71910063073865
7.67567957375877 7.80896147097455 5.10499057345839 5.77398976803203 6.63108659227503
6.00467213775456 5.97168441438834 6.23054863757366 6.13265523485431 5.45767747665232
5.53285616431262 5.36022715298585 6.64070678362899 6.66712287653801 7.00342912017379
6.00394517146616 6.37168727788872 5.19741045777644 5.14197213217946 5.12078664402542
6.93220687221635 5.50816028779358 6.22979181651235 6.06846243066318 6.88881549937437
4.85263738002543 6.08701808977737 7.1163984550521 5.21819195967591 6.8818927541522
6.56402651360269 5.48425664789336 5.27472352302403 5.66575702837097 5.23310062360168
6.45326020671967 7.86692770192071 6.96964762461946 6.51976034761111 6.06699942662775
6.39252031856237 6.52724643453943 6.86478991335898 4.82952058786887 5.80409842972881
4.18645698320617 4.50781333769438 6.15561856594004 6.68825600276454 7.45321131893553
6.99260186124596 5.44862179771402 6.32249703171493 3.60745551485831 6.01666450702604
6.38823062822725 5.6995442969756 6.25054082471803 6.09606936422139 6.32458119228608
7.38399425049219 6.16453762650375 5.83645425418152 6.58274819663026 6.04581381882401
3.99774230587635 4.17403139621837 5.83049961390891 6.1218268700911 5.09875788504503
5.97473956352417 6.81762442100051 5.97265574403787 6.27679945197341 6.03324998160336
4.91245860786336 5.95515906587093 5.97304468660316 5.01724568742016 6.78810740248643
4.47977614882819 7.80442114246275 4.8552214668638 5.41365920967234 7.81507950589778

```
5.96172360946759  6.2868033089714  5.25494047463794  6.85205396979767  6.02515904477487
5.63335795073391  5.68763906229324  5.52363509034947  4.62815287179505  6.23989685035346
4.74075023795003  5.55749816191145  4.71567203796144  6.1208435441808  5.76086209620612
3.02176654201937  6.31158287579865  3.91015485466483  6.2295395803539  5.87718962907119
4.40017720241813  6.76449060868988  4.01118996372158  5.98103553469837  5.80859385403385
5.26101066347632  6.97469898269743  5.98430596102794  6.61509749029101  6.19015833210813
7.62720810000659  5.98527636356651  5.07382513885519  6.66648779812324  4.62246452848081
5.75706559855699  6.83836851954344  6.1757118644966  4.34739632902194  6.87349551503236
5.04740622427988  6.0004171846582  5.79659436126045  3.93174384834398  5.81607487933134
6.81762442100051  5.74514075272464  7.45321131893553  6.63666431586246  6.78530334320461
5.82254728828798  7.6304555454918  6.03930185459031  6.86215496525668  7.36972658374479
6.37541206958083  6.24166841081276  6.45519768976809  5.84611367489484  5.58969232968598
5.99909804772462  7.09575216559297  6.06090637830042  5.9855189540774  6.3481493122922
6.23357762010723  5.0399576208785  5.58101285417952  6.03615495075164  3.17104882347531
5.16456731517907  4.48602184358351  7.83549456690182  6.71171652371471  5.48110125383592
6.02030436220149  5.79734543725248  3.4150784301462  4.822556218596  6.17720397494905
6.88036080063356  7.28060209321325  6.50916486078802  7.52562974835642  5.18093282415781
9.27989943503045  7.89869219274522  5.62458793041917  6.91978204655291  5.80634678992972
6.66205078908855  4.91772827004246  5.12460210920121  6.52090984605441  5.66340117046645
5.45301004603326  7.85344779887357  7.3353430936861  5.68971338159173  6.74912363792586
6.3653162211738  4.5610905860232  5.90368583527973  6.63201465040731  6.25867459817436
5.68660128637613  8.03772285475668  6.50659763579285  6.06626802376834  5.80334868597469
5.44656975248183  6.23332510060295  6.18591869523368  6.87349551503236  6.01678479578575
6.11912314156416  5.09992950091404  6.18940983285773  5.50844286383177  6.34867565574964
6.29040306552236  6.83140909313021  5.98430596102794  4.77019350799259  5.34268672294151
4.53706893771766];

    %Media da populacao
    MUpop = sum(Distr)/NumRuns;

    %Desvio padrao da populacao
    SIGMApop = sqrt(sum((Distr-MUpop).*(Distr-MUpop))/(NumRuns-1));

    %Histograma com 50 bins
    [FREQ,Distrbins] = hist(Distr,50);
    FREQ = 100 * FREQ/sum(FREQ);

    %Distancia entre duas barras
    dx = Distrbins(2) - Distrbins(1);

    %Area de todas as barras
    AREA = sum(FREQ) * dx;
```

```
%Valor mínimo do histograma
Xmin = min(Distr);

%Valor maximo do histograma
Xmax = max(Distr);

%Diferenca entre os valores minimo e maximo do histograma
L = Xmax-Xmin;

%Folga no valor minimo do histograma
Xmin = Xmin - L*0.1;

%Folga no valor maximo do histograma
Xmax = Xmax + L*0.1;

%Vetor de 1000 pontos no intervalo do histograma
X = linspace(Xmin, Xmax, 1000);

%Vetor para montar a curva da distribuição normal (MU, sigma) ao longo do vetor X
Y = AREA *pdf('normal',X,MUpop,SIGMApop);

figure(1)
bar(Distrbins,FREQ,1,'c');
hold on
plot(X,Y,'-r','linewidth',3);
legend (strvcat('Histograma','Normal PDF Ajustada'), 'location','northwest');
grid on
xlabel ('VazaoGN(MMsm3/d)','fontsize',12,'fontweight','bold','fontangle','italic');
ylabel ('Frequencia %','fontsize',12,'fontweight','bold','fontangle','italic');
title (['Populacao de VazaoGN (MMsm3/d), N=' int2str(NumRuns) ', Media=' num2str(MU) ', Desvio Padrao(DP)=' num2str(SIGMA) ', Media da Populacao=' num2str(MUpop) ' , DP da Populacao =' num2str(SIGMApop)], 'fontsize',12,'fontweight','bold','fontangle','italic');
```

8.4. Arquivo XML da Biblioteca de Leitura

O arquivo XML contendo a biblioteca simplificada de leitura de parâmetros a serem lidos da simulação do software HYSYS se encontra neste anexo.

```
<?xml version = '1.0'?>
<Collections>
```

```
<Collection>
        <Collection_Name>Correntes de Processo</Collection_Name>
        <Collection_Class>MaterialStreams</Collection_Class>
        <SpecificFunction>NA</SpecificFunction>
        <ExtraFeatureFunctions>
                <ExtraFeatureFunction>CalcularWDP</ExtraFeatureFunction>
                <ExtraFeatureFunction>CalcularHCDP</ExtraFeatureFunction>
        </ExtraFeatureFunctions>
        <Attributes>
                <Attribute>
                        <Attribute_Name>Temperature</Attribute_Name>
                        <Attribute_Description>Temperature</Attribute_Description>
                        <Attribute_Type>RealVariable</Attribute_Type>
                        <Attribute_Unit>C</Attribute_Unit>
                </Attribute>
                <Attribute>
                        <Attribute_Name>Pressure</Attribute_Name>
                        <Attribute_Description>Pressure</Attribute_Description>
                        <Attribute_Type>RealVariable</Attribute_Type>
                        <Attribute_Unit>bar</Attribute_Unit>
                </Attribute>
                <Attribute>
                        <Attribute_Name>MolarFlow</Attribute_Name>
                        <Attribute_Description>Molar Flow</Attribute_Description>
                        <Attribute_Type>RealVariable</Attribute_Type>
                        <Attribute_Unit>kgmole/h</Attribute_Unit>
                </Attribute>
        </Attributes>
</Collection>
<Collection>
        <Collection_Name>Correntes de Energia</Collection_Name>
        <Collection_Class>EnergyStreams</Collection_Class>
        <SpecificFunction>NA</SpecificFunction>
        <ExtraFeatureFunctions>
        </ExtraFeatureFunctions>
        <Attributes>
                <Attribute>
                        <Attribute_Name>HeatFlow</Attribute_Name>
                        <Attribute_Description>Heat Flow</Attribute_Description>
                        <Attribute_Type>RealVariable</Attribute_Type>
                        <Attribute_Unit>kJ/h</Attribute_Unit>
                </Attribute>
```

```
            </Attributes>
        </Collection>
        <Collection>
            <Collection_Name>Componentes de Correntes de Processo</Collection_Name>
            <Collection_Class>MaterialStreams</Collection_Class>
            <SpecificFunction>LerDadosComponentes</SpecificFunction>
            <ExtraFeatureFunctions>
            </ExtraFeatureFunctions>
            <Attributes>
                <Attribute>
                    <Attribute_Name>ComponentMolarFraction</Attribute_Name>
                    <Attribute_Description>Molar Fraction</Attribute_Description>
                    <Attribute_Type>RealFlexVariable</Attribute_Type>
                    <Attribute_Unit>NA</Attribute_Unit>
                </Attribute>
            </Attributes>
        </Collection>
</Collections>
```

8.5. Arquivo XML de Parâmetros da Análise de Monte Carlo

O arquivo XML contendo os parâmetros relevantes para a análise de Monte Carlo se encontra neste anexo.

```
<?xml version = '1.0'?>
<Variables>
        <Variable>
            <Variable_Name>Ponto de Orvalho Agua GN final</Variable_Name>
            <Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
            <Collection_Name>Correntes de Processo</Collection_Name>
            <Object_Name>CP-041 (GN final)</Object_Name>
            <Attribute_Name>WDP</Attribute_Name>
            <MCStatus>Relevant</MCStatus>
            <MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
            <MaximumCondition_Value>-45</MaximumCondition_Value>
        </Variable>
        <Variable>
            <Variable_Name>Ponto de Orvalho Hidrocarbonetos GN final</Variable_Name>
            <Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
            <Collection_Name>Correntes de Processo</Collection_Name>
            <Object_Name>CP-041 (GN final)</Object_Name>
```

<Attribute_Name>HCDP</Attribute_Name>
<MCStatus>Relevant</MCStatus>
<MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
<MaximumCondition_Value>0</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Vazao Molar GN final</Variable_Name>
<Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
<Collection_Name>Correntes de Processo</Collection_Name>
<Object_Name>CP-041 (GN final)</Object_Name>
<Attribute_Name>MolarFlow</Attribute_Name>
<MCStatus>Relevant</MCStatus>
<MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
<MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Fracao Molar CO2 GN final</Variable_Name>
<Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
<Collection_Name>Componentes de Correntes de Processo</Collection_Name>
<Object_Name>CP-041 (GN final)</Object_Name>
<Attribute_Name>CO2ComponentMolarFraction</Attribute_Name>
<MCStatus>Relevant</MCStatus>
<MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
<MaximumCondition_Value>0.03</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Fracao Molar C1 GN final</Variable_Name>
<Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
<Collection_Name>Componentes de Correntes de Processo</Collection_Name>
<Object_Name>CP-041 (GN final)</Object_Name>
<Attribute_Name>MethaneComponentMolarFraction</Attribute_Name>
<MCStatus>Relevant</MCStatus>
<MinimumCondition_Value>0.85</MinimumCondition_Value>
<MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Vazao Molar CO2 reinjecao</Variable_Name>
<Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
<Collection_Name>Correntes de Processo</Collection_Name>
<Object_Name>CP-061 (CO2 reinjeção)</Object_Name>
<Attribute_Name>MolarFlow</Attribute_Name>
<MCStatus>Relevant</MCStatus>

<MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
<MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Fracao Molar CO2 CO2 reinjecao</Variable_Name>
<Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
<Collection_Name>Componentes de Correntes de Processo</Collection_Name>
<Object_Name>CP-061 (CO2 reinjeção)</Object_Name>
<Attribute_Name>CO2ComponentMolarFraction</Attribute_Name>
<MCStatus>Relevant</MCStatus>
<MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
<MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Vazao Molar Pesados</Variable_Name>
<Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
<Collection_Name>Correntes de Processo</Collection_Name>
<Object_Name>CP-022 (LGN)</Object_Name>
<Attribute_Name>MolarFlow</Attribute_Name>
<MCStatus>Relevant</MCStatus>
<MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
<MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Fracao Molar C1 Pesados</Variable_Name>
<Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
<Collection_Name>Componentes de Correntes de Processo</Collection_Name>
<Object_Name>CP-022 (LGN)</Object_Name>
<Attribute_Name>MethaneComponentMolarFraction</Attribute_Name>
<MCStatus>Relevant</MCStatus>
<MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
<MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Potencia Primeiro Compressor CO2</Variable_Name>
<Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
<Collection_Name>Correntes de Energia</Collection_Name>
<Object_Name>CE-012</Object_Name>
<Attribute_Name>HeatFlow</Attribute_Name>
<MCStatus>Auxiliar</MCStatus>
<MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
<MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>

```
        </Variable>
<Variable>
        <Variable_Name>Potencia Segundo Compressor CO2</Variable_Name>
        <Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
        <Collection_Name>Correntes de Energia</Collection_Name>
        <Object_Name>CE-014</Object_Name>
        <Attribute_Name>HeatFlow</Attribute_Name>
        <MCStatus>Auxiliar</MCStatus>
        <MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
        <MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
        <Variable_Name>Potencia Terceiro Compressor CO2</Variable_Name>
        <Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
        <Collection_Name>Correntes de Energia</Collection_Name>
        <Object_Name>CE-016</Object_Name>
        <Attribute_Name>HeatFlow</Attribute_Name>
        <MCStatus>Auxiliar</MCStatus>
        <MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
        <MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
        <Variable_Name>Potencia Quarto Compressor CO2</Variable_Name>
        <Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
        <Collection_Name>Correntes de Energia</Collection_Name>
        <Object_Name>CE-018</Object_Name>
        <Attribute_Name>HeatFlow</Attribute_Name>
        <MCStatus>Auxiliar</MCStatus>
        <MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
        <MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
        <Variable_Name>Potencia Quinto Compressor CO2</Variable_Name>
        <Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
        <Collection_Name>Correntes de Energia</Collection_Name>
        <Object_Name>CE-020</Object_Name>
        <Attribute_Name>HeatFlow</Attribute_Name>
        <MCStatus>Auxiliar</MCStatus>
        <MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
        <MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
```

<Variable_Name>Potencia Compressores CO2</Variable_Name>
<Variable_Type>Expression</Variable_Type>
<Variable_Unit>kJ/h</Variable_Unit>
<ImpactVariables>
<Variable_Index>9</Variable_Index>
<Variable_Index>10</Variable_Index>
<Variable_Index>11</Variable_Index>
<Variable_Index>12</Variable_Index>
<Variable_Index>13</Variable_Index>
</ImpactVariables>
<Expressions>
<Expression>
<Operator>Sum</Operator>
<Parameter1>Variable_0</Parameter1>
<Parameter2>Variable_1</Parameter2>
</Expression>
<Expression>
<Operator>Sum</Operator>
<Parameter1>Expression_0</Parameter1>
<Parameter2>Variable_2</Parameter2>
</Expression>
<Expression>
<Operator>Sum</Operator>
<Parameter1>Expression_1</Parameter1>
<Parameter2>Variable_3</Parameter2>
</Expression>
<Expression>
<Operator>Sum</Operator>
<Parameter1>Expression_2</Parameter1>
<Parameter2>Variable_4</Parameter2>
</Expression>
</Expressions>
<MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
<MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Potencia Primeiro Trocador CO2</Variable_Name>
<Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
<Collection_Name>Correntes de Energia</Collection_Name>
<Object_Name>CE-013</Object_Name>
<Attribute_Name>HeatFlow</Attribute_Name>
<MCStatus>Auxiliar</MCStatus>

<MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
<MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Potencia Segundo Trocador CO2</Variable_Name>
<Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
<Collection_Name>Correntes de Energia</Collection_Name>
<Object_Name>CE-015</Object_Name>
<Attribute_Name>HeatFlow</Attribute_Name>
<MCStatus>Auxiliar</MCStatus>
<MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
<MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Potencia Terceiro Trocador CO2</Variable_Name>
<Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
<Collection_Name>Correntes de Energia</Collection_Name>
<Object_Name>CE-017</Object_Name>
<Attribute_Name>HeatFlow</Attribute_Name>
<MCStatus>Auxiliar</MCStatus>
<MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
<MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Potencia Quarto Trocador CO2</Variable_Name>
<Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
<Collection_Name>Correntes de Energia</Collection_Name>
<Object_Name>CE-019</Object_Name>
<Attribute_Name>HeatFlow</Attribute_Name>
<MCStatus>Auxiliar</MCStatus>
<MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
<MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Potencia Quinto Trocador CO2</Variable_Name>
<Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
<Collection_Name>Correntes de Energia</Collection_Name>
<Object_Name>CE-021</Object_Name>
<Attribute_Name>HeatFlow</Attribute_Name>
<MCStatus>Auxiliar</MCStatus>
<MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
<MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>

```
</Variable>
<Variable>
        <Variable_Name>Potencia Trocadores CO2</Variable_Name>
        <Variable_Type>Expression</Variable_Type>
        <Variable_Unit>kJ/h</Variable_Unit>
        <ImpactVariables>
                <Variable_Index>15</Variable_Index>
                <Variable_Index>16</Variable_Index>
                <Variable_Index>17</Variable_Index>
                <Variable_Index>18</Variable_Index>
                <Variable_Index>19</Variable_Index>
        </ImpactVariables>
        <Expressions>
                <Expression>
                        <Operator>Sum</Operator>
                        <Parameter1>Variable_0</Parameter1>
                        <Parameter2>Variable_1</Parameter2>
                </Expression>
                <Expression>
                        <Operator>Sum</Operator>
                        <Parameter1>Expression_0</Parameter1>
                        <Parameter2>Variable_2</Parameter2>
                </Expression>
                <Expression>
                        <Operator>Sum</Operator>
                        <Parameter1>Expression_1</Parameter1>
                        <Parameter2>Variable_3</Parameter2>
                </Expression>
                <Expression>
                        <Operator>Sum</Operator>
                        <Parameter1>Expression_2</Parameter1>
                        <Parameter2>Variable_4</Parameter2>
                </Expression>
        </Expressions>
        <MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
        <MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
        <Variable_Name>Potencia Compressor Inicial</Variable_Name>
        <Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
        <Collection_Name>Correntes de Energia</Collection_Name>
        <Object_Name>CE-001</Object_Name>
```

<Attribute_Name>HeatFlow</Attribute_Name>
<MCStatus>Relevant</MCStatus>
<MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
<MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Potencia Trocador Inicial</Variable_Name>
<Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
<Collection_Name>Correntes de Energia</Collection_Name>
<Object_Name>CE-002</Object_Name>
<Attribute_Name>HeatFlow</Attribute_Name>
<MCStatus>Relevant</MCStatus>
<MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
<MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Potencia Compressor JT</Variable_Name>
<Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
<Collection_Name>Correntes de Energia</Collection_Name>
<Object_Name>CE-003</Object_Name>
<Attribute_Name>HeatFlow</Attribute_Name>
<MCStatus>Relevant</MCStatus>
<MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
<MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>PotenciaTrocador JT</Variable_Name>
<Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
<Collection_Name>Correntes de Energia</Collection_Name>
<Object_Name>CE-004</Object_Name>
<Attribute_Name>HeatFlow</Attribute_Name>
<MCStatus>Relevant</MCStatus>
<MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
<MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
<Variable>
<Variable_Name>Potencia Regenerador TEG</Variable_Name>
<Variable_Type>Hysys_Direct</Variable_Type>
<Collection_Name>Correntes de Energia</Collection_Name>
<Object_Name>CE-008</Object_Name>
<Attribute_Name>HeatFlow</Attribute_Name>
<MCStatus>Relevant</MCStatus>

<MinimumCondition_Value>NA</MinimumCondition_Value>
<MaximumCondition_Value>NA</MaximumCondition_Value>
</Variable>
</Variables>

8.6. Arquivo Matlab para Geração de Curva PDF, Histograma e Estatísticas de Atendimento a Especificações de Dados de Saída

O arquivo em formato MATLAB gerado pela ferramenta para geração da curva PDF, histograma de barra e estatísticas de atendimento a especificações da fração molar de 2 no gás natural final se encontra neste anexo.

```
function [] = FracaoMolarCO2GNfinal
%Limpar variaveis e tela
clc
clear all

%Quantidade de rodadas(populacao)
NumRuns = 1000;

%Media
MU = 0;

%Desvio Padrao
SIGMA = 0;

%Vetor da populacao da distribuicao normal
Distr = [ 0.00883902770476384 0.0143393402798171 0.0195243239296005 0.0441238542732315
0.00924176020837091 0.0413538620850405 0.00979140718352018 0.0353367059137186
0.0272679718839618 0.0267852085119445 0.0513195807830581 0.0281083573327969
0.0169727404417098 0.0362499180647125 0.0469099689310823 0.0211338140905664
0.0373419274582873 0.0264945557316457 0.0186073597406452 0.0315552324390258
0.00834879341829558 0.0395438044086585 0.0444132391657738 0.033561580911173
0.0249565112151423 0.0325445575723787 0.0240444685411228 0.0224757991610589
0.0146166316083699 0.016440553498261 0.0253643576834086 0.0403410823228387
0.0259278215449261 0.0293233171899394 0.0428443432025955 0.030227977599615
0.0580577959138394 0.0210344647136781 0.0512984573813799 0.0207822297860456
0.0500401164395025 0.0517039874899528 0.0324953015740085 0.0293073153440844
0.0471367002030245 0.0187119619790236 0.029517051848315 0.0358680599598276
0.00815411091228927 0.0228959760742468 0.0110463863161986 0.048891227162009
0.0249283100582686 0.0265170067102008 0.0248190426435216 0.0242431963937464
```

0.0207949035591437 0.0336730500976278 0.0295318992315586 0.0266446654104357
0.0367411091207464 0.033034032746188 0.0354458995988817 0.0266000061314976
0.0124973122264814 0.0144983462133217 0.00239778540928686 0.0332521117896927
0.0486773629751179 0.0245278849263996 0.0218813954446682 0.0272602417683574
0.0200912349807181 0.038010448191182 0.0279663119274779 0.0127933785803391
0.0258151153698602 0.0324333608368685 0.0396161693566424 0.0179355010757187
0.00938374885122452 0.0349657700591738 0.031024843092731 0.0348137554027066
0.0109669216125093 0.0274199049261365 0.0328483702544866 0.0413997615611966
0.0215637596015988 0.0351620464123562 0.029220839981078 0.0230641268892784
0.0287310922081907 0.0285108637954354 0.02892681695258 0.0279813881357182
0.0212085034567242 0.00846864477067658 0.0259442181360161 0.0398052330520659
0.0233817882050409 0.0485241318501838 0.0284957938728637 0.0352500298520208
0.0585118563547708 0.0294734063820193 0.0340494784576927 0.0259381297555779
0.0334550849148141 0.0196704736526155 0.0358206672233099 0.0368797449532348
0.0321855681095211 0.0316566412057761 0.0255999496428683 0.0391016441296818
0.0215012517072657 0.0413387510172774 0.0220638681076303 0.0307657794614406
0.0285589638699244 0.0170952809781324 0.030817104309141 0.0207919918467612
0.0440444374575794 0.0335993154127193 0.0520963301205596 0.0389966009553806
0.0200485678669111 0.0202397231202139 0.0353556116597715 0.0214228576588839
0.0255748959089422 0.0175612686888866 0.0447322542289434 0.0172469550166794
0.0189178482555551 0.0311934739028148 0.0429038068370489 0.0308426384588403
0.0445550853987724 0.021505741054082 0.0152082341204793 0.0468506996492625
0.0362264129864095 0.0406319013880723 0.0439296435575538 0.0200474310552865 0.0243688851288
0.0399789538886272 0.017643084102416 0.0270548943296933 0.0296733827653881
0.0311454488548064 0.022447441717723 0.0141204908145854 0.0237600684806005
0.0280353273184173 0.0325789383744602 0.0258518106299211 0.0319949590076658
0.0331388561170256 0.0236869721308753 0.034152213518979 0.0313665511534415
0.0365962844192193 0.0219816570485856 0.0235668981313853 0.027985992804461
0.0186848826825829 0.0306457967212263 0.0285831780126804 0.0160216883426188
0.0449034723116134 0.042907570008725 0.020812251011122 0.052511130310173 0.0353745035378953
0.0228623996012769 0.0192448703643562 0.0426903116200589 0.0364919108128429
0.0320421572104339 0.0283593008269518 0.0492192366094923 0.0277815700595678
0.037081090547033 0.0323709212693262 0.0356133831852093 0.0375113142724282
0.0410833273568043 0.0377807909593048 0.0373882666821913 0.0351725984934762
0.0590413122285209 0.0493750979374792 0.00572844597102835 0.028568620037573
0.0305849136366328 0.0190959060741144 0.0302778791454201 0.0280054149303018
0.0382784715572672 0.0566734827495297 0.0185661154903766 0.0346853771098136
0.0217315576357301 0.0264353394382382 0.0295710784372595 0.0164644966193244
0.0177898337833615 0.0346882362562315 0.0568331866163271 0.0318661951197635
0.0236452641763539 0.0449165700658477 0.0238270940684245 0.0260260672465867
0.0292133088889718 0.0124741290431842 0.0372548729889518 0.0341077818987823
0.03495219014356 0.0267339696423456 0.0248763910090006 0.0293531107223812

0.0276520050659792 0.0293486984439332 0.0480374481750658 0.013777255800506
0.0246499001947209 0.0260628662633466 0.0141494693652471 0.0222010623204752
0.0381562947757198 0.0259614370611395 0.056461015496784 0.0342212927205373
0.0188883128428318 0.0247716547268155 0.0157560763941729 0.0201823648376728
0.0180381650785021 0.0356615177785307 0.0245944877876367 0.0153767632376044
0.0399876322127537 0.0257031125027355 0.0200024508152975 0.0141721592144247
0.0305656553349021 0.0170224000834626 0.0343957747189964 0.028382460804865
0.0213060977751367 0.0239236800836391 0.0368200522537536 0.0166842338416817
0.0314641429982585 0.0203646105413255 0.0185477204367177 0.0363191148795545
0.0319943646640455 0.0376087993151509 0.0484238371219168 0.0307648305946948
0.0307462222229589 0.031187247741957 0.0425779369113141 0.0159218481206765
0.0350971832782121 0.034239704213135 0.0324214577766578 0.026534581038588
0.0501090316374694 0.0364710412108478 0.0327754592074162 0.0413587046855122
0.0348908091461152 0.0191816905890249 0.0437369599778564 0.0218210698188362
0.0282779687207171 0.0399248436627949 0.0305932857225339 0.0174375148182852
0.0387279082773812 0.0335500278437899 0.00832871413061622 0.0460170969371832
0.0349180288060839 0.0293249282279434 0.0463742759269728 0.0358802250576538
0.0126983646971254 0.0280476767238504 0.0351070852933153 0.0357583145745045
0.0423875404045327 0.0178659818866835 0.0325103726845279 0.0155528702534097
0.0322450886764558 0.0123633431071124 0.0249084321175975 0.0357883942632282
0.02300545745951 0.0283129708653413 0.0337440407237303 0.031745968451755 0.0209250755847905
0.0388630660643643 0.0199107646718774 0.0237296721958582 0.0300897053089928
0.0103266673040342 0.0315210751045824 0.0326475475309945 0.0135974413130981
0.0339916029493308 0.0400141015538098 0.00875756898581046 0.0431697890059927
0.00974273749098762 0.0311617125861282 0.041155993715842 0.0307452464816514
0.0157007618550691 0.028175263555974 0.0347454177085963 0.0203647263022377
0.0113731024945868 0.0133454072053116 0.0373129189094081 0.0338462995996845
0.0429147857929333 0.0402630184362872 0.0249071637864457 0.0319448188120513
0.0329064521596759 0.0347527162041076 0.0216024898085742 0.0184614493279735
0.0289444761828953 0.0339549326518197 0.0331756135471109 0.0333413931678953
0.0362569439513018 0.0189495975952902 0.00821228855823922 0.0532194498972731
0.0426969256398994 0.0302887134694206 0.0162277080632779 0.0200051594104406
0.0257365735041072 0.0255648787490563 0.0252861463723665 0.0308947900856052
0.0252751271234479 0.0125049309412512 0.024126902115134 0.0140657248987773
0.0366423803823076 0.0291637083301726 0.021599659469995 0.0396591507681805
0.0243763018562576 0.0275552282380842 0.0246400973451059 0.0224443500208603
0.0550585447694748 0.0176718715402287 0.0293178016571984 0.0396390017499677
0.028057131819054 0.0473913998620291 0.0218736966853388 0.0205705095287194
0.050138515663274 0.023815242985619 0.0130647920689176 0.0375811465772125
0.0254546299869892 0.0361445617910585 0.0202719881163253 0.0260378689700916
0.043051247293477 0.0257731425283874 0.0306949670335543 0.0256629926949681
0.025604677930596 0.0412253177117058 0.0272647429428585 0.030769013918582

0.0291878811390665	0.0214732931999429	0.0237052981489621	0.020100651770002
0.0262775131186649	0.0320749757008417	0.0296824914673988	0.0222748537055344
0.0267479670319208	0.0378735314719306	0.04377472003612	0.0305356359907587
0.0155313783199558	0.0247969728271636	0.0271814700730026	0.0277396630135173
0.015234081595236	0.0112824362697696	0.0329597669304019	0.0160775143029345
0.00817621702811906	0.0267974714065647	0.0326023726043379	0.0177072279307325
0.0143953322968172	0.0309597371855522	0.0501910860322644	0.0337211799222975
0.0170258864751028	0.0389205634548835	0.045364683819371	0.0153992797901394
0.0387146175832986	0.0370876650342266	0.0282990006703378	0.0297012290808455
0.0319631827557287	0.00962975383162674	0.0465773696999222	0.0219750436662775
0.030830471007259	0.0268227291602643	0.0189885618260526	0.0323493831308272
0.035245818120774	0.0342784627638484	0.0282277571887381	0.0362228414823538
0.0334784925178518	0.036769236686464	0.0331238164266569	0.0246496090312701
0.0267462964123332	0.0263389835677302	0.0328374817113995	0.0218088834471909
0.0352540896846708	0.0231006775585068	0.0189277816631792	0.0312884983102011
0.0356408696093969	0.0338724718283712	0.0219636111671157	0.0278259128483782
0.0301058433681917	0.0452821461707148	0.0469992213730089	0.022730864940715
0.0346041165882679	0.0202286436741722	0.0532268768178308	0.0197685144755273
0.0165320862927128	0.0229227753404515	0.0254986036325727	0.0227194209912414
0.0183902313999731	0.0162361706228174	0.020182443032579	0.0333108590583718
0.0231190450279177	0.0282403649590713	0.035670047094312	0.0263928919808629
0.0239493523570897	0.0297367107942704	0.0363659712066031	0.0328414218973286
0.0229283463422441	0.0246431894524742	0.0295476936148296	0.0267743258449632
0.0411127005071567	0.0210364828436934	0.0254271118691632	0.0141307960453912
0.0254382138948039	0.0258024694096376	0.0375795366674854	0.0404960922127185
0.0312311418153472	0.0237567593633535	0.044547928108943	0.0382136334221376
0.0454671902119369	0.0169673397773537	0.0229998315699716	0.0149182883374073
0.0434870441806295	0.0298031281354966	0.0117838942949664	0.0274519724738046
0.0417673477586815	0.0336335472435406	0.0278435274716388	0.0284999196818488
0.0396175806660129	0.0343244047059358	0.0126175272404201	0.0204611140907115
0.0178553747837631	0.0283634292317786	0.0143270733047592	0.0303691934038155
0.0228878230648189	0.0270482808393906	0.020814007503804	0.0483580411412748
0.0336991391837735	0.0193737980853182	0.030808208832383	0.0290543128961054
0.028002725251152	0.0296922022866574	0.0417153389454634	0.0386811216839049
0.0246278745381892	0.0146628516564567	0.0315140700563991	0.0178767960750043
0.0261055600030435	0.0317866193142339	0.0307375795850725	0.042438072939547
0.0213356589625855	0.0250240481211441	0.033148667565123	0.0255938058208136
0.0315608240282096	0.0447503355261549	0.015808020921853	0.0422627562195628
0.0253773822871926	0.0358124545812939	0.0340049111576498	0.0145800158179485
0.0174738349833385	0.0294891712341713	0.0204492146189315	0.0229678676557541
0.0175896100241784	0.0289828153385648	0.0196738308778775	0.0405279218332852
0.0362977672574193	0.0245805224378962	0.0191704386527768	0.0224982208326481

0.0318513800380034 0.026504201145913 0.0225047487682245 0.0438470758059333
0.0221595877989674 0.0492848230827101 0.0353277918681393 0.0303614932146316
0.0515516113993685 0.0240852910768657 0.0222819683469429 0.0212323380157482
0.0447560683450705 0.0460058811159141 0.023573217305039 0.0475557531670084
0.0190869570115402 0.0266249707947382 0.0153538561913252 0.0261452187747441
0.0445062159234991 0.036323977846404 0.0422751264337814 0.0456152604409594
0.0454330002861793 0.0291305633852577 0.0185652914153983 0.0167480183881256
0.0265917192734195 0.0389949587195869 0.00839073519565687 0.0335991285621764
0.0162820420007722 0.0226971234120912 0.03016022018523 0.0506209633362048
0.0385934316423058 0.0234968984463847 0.0391696619420547 0.0288571158370968
0.0403269133283365 0.0196922493748921 0.0176192395755789 0.0421320145739102
0.0201341180829923 0.0419394849454457 0.02077134011827 0.0220206869585106
0.0128233846340935 0.0240050828409648 0.0308174861014833 0.0172334925723623
0.0289498206684786 0.0279649648708911 0.0272308288590769 0.0283711971592796
0.0324428324752074 0.0288445382294836 0.0417449548898777 0.041740495552107
0.035013082416996 0.0360483848907983 0.0173380282059158 0.023766007017216
0.0206981925142432 0.0237118404251105 0.0202613713550836 0.0304448943300556
0.0311323999091334 0.0224857760778793 0.0228484393760434 0.0497167966339328
0.0021914650775744 0.0213582363175975 0.0355422668430598 0.0278261764326673
0.0363132229273004 0.0405654563862928 0.0328614709807157 0.0152564447210016
0.0175119797832329 0.0480902362951359 0.0116147157301593 0.0202655718970444
0.0180361716696861 0.0381423904484725 0.0259189824716621 0.0267260371131076
0.0465737152581745 0.033931288403067 0.0174080076946528 0.0299524316342483
0.0237301271722937 0.0333777644275 0.042217156302678 0.0225384030633668 0.0520723907344119
0.0421076530908554 0.0429747360495822 0.0343027230120867 0.0375697973096943
0.0357533502942904 0.0441076263159942 0.0335998145211194 0.0430915014526458
0.0338607366025585 0.0165014805383854 0.0441475565625293 0.0387085118336997
0.034179283021868 0.0183036591750344 0.00531375552087915 0.0332771057943573
0.0389423150633321 0.0295101227970605 0.0400975233394915 0.0343450163441588
0.048247021459622 0.0163512810501811 0.0183588066950781 0.0148722908548306
0.0321333570127842 0.0369307195038956 0.0344076353836987 0.0150722760088952
0.0426192631296015 0.0384044263741439 0.0160975427039688 0.0294503921373934
0.0320257377681171 0.0337034457667295 0.0348755832043926 0.0176974043119488
0.0370912666719152 0.0208556622115301 0.0228724983253605 0.0204646181605536
0.00836185005909583 0.0444142983102118 0.0206122165729285 0.0548576314309939
0.0202131778644959 0.0193765593815405 0.0342147158390849 0.0308515158568765
0.0379715587022825 0.0267702131717309 0.0216024276516334 0.0360586348626695
0.0232108217137698 0.0444501340648248 0.0318236556358009 0.034341091261851
0.0387794643242213 0.0194242260213684 0.0258633738222264 0.0164836457049203
0.031414204376693 0.0287593266306881 0.0343160787196279 0.018840129051143
0.0495995120480266 0.0231188556957466 0.0270211950062429 0.0197107585956761
0.0134878659827051 0.0275522010915085 0.018368020788827 0.0102669148263415

0.0340070169713871 0.029495034534843 0.0327189412441552 0.0442640415902998
0.0234341919431727 0.0295856761649409 0.0418735524828143 0.0337148572470024
0.0603535181635534 0.0246217982428237 0.0466615086451654 0.034626971502166
0.0298144281034472 0.0374622400819256 0.0235127835530319 0.0419366814536108
0.0296368726543131 0.0339548084676303 0.0428794862677531 0.0344398012793242
0.0225123524467222 0.025656576144508 0.01985684800254 0.0317382872041006 0.0567676215699284
0.0197835870596309 0.0170218038604325 0.0536238137146413 0.0420766347278313
0.0267870789895376 0.0322310532354331 0.0239300179858713 0.018791729797453
0.0177812970422545 0.023801270985046 0.0316400807659453 0.0193018637033018
0.0258434746276049 0.0196595707970358 0.0203194814566853 0.0278660700324571
0.0105463704765991 0.0180126497531252 0.0273710747559147 0.025712169143915
0.0228047638772862 0.0302113716227197 0.0164192073977096 0.0330298132538548
0.0251570450518682 0.0350479708002099 0.0311954880848381 0.0334485049282087
0.0333693398444269 0.0391541294356281 0.0193370876042563 0.0297634463137895
0.0435430537515208 0.0472685409668786 0.014333126879171 0.0294580843186126
0.0266481425513195 0.0290635182797064 0.029300707449566 0.0293194093276873
0.0298322558763165 0.0249945728613474 0.0285640351577817 0.0247231953290449
0.0394077735929164 0.0429696617157913 0.0412155333803765 0.0329157683532201
0.032696240561656 0.0192762720395417 0.0197595064221324 0.0187183526762004
0.0389148251648941 0.0178895367890684 0.03223679742385 0.0336451332545782
0.0411365342083397 0.0183434599336835 0.0331583714428701 0.0405714975212572
0.021849905884734 0.0371867736641244 0.0324623779403283 0.0222971696305516
0.0228214809156191 0.0246054128194647 0.0196487826792513 0.0339818753846625
0.0533803527791766 0.0365583958378538 0.0332523254773339 0.0303954455199742
0.0357255077923303 0.0359618372248773 0.0422505869366098 0.0163964449096965
0.0247201217554351 0.00998282384579066 0.0134341615535224 0.03097982187746
0.0343005072647278 0.0547844473318413 0.0412207942061336 0.0243003449359337
0.0404503825449577 0.0056196439591847 0.0278861263208363 0.0298537821591226
0.0268545530979726 0.0276867121450147 0.0276094822325138 0.0296802766035538
0.0473020042405097 0.0284941067815663 0.0269471115559112 0.0303700137624626
0.0291155583360066 0.00949065612750802 0.00798960163073753 0.0259174922579463
0.0314473399710538 0.0227942511205387 0.0253650459023601 0.0328798013327065
0.0313334936078244 0.0357570041375707 0.0299426154270213 0.0200229408948943
0.02660765350727 0.0279771525899225 0.019401777951776 0.0375620997645374 0.0130383743185804
0.0442338030291787 0.0148805297623686 0.0236034555165543 0.0528882002229684
0.0294150119659798 0.030830487570282 0.0223249674645057 0.0439913059260093
0.0256451695208805 0.0270232302798314 0.0273357005449607 0.0277292298424153
0.0137965710664391 0.0337354698432624 0.01628194294064 0.0210813705821686
0.0161991905914803 0.0326619213176197 0.0271116360510911 0.00272433797418606
0.0380852600671086 0.00941920258711477 0.0307451851724107 0.0311206918585142
0.0126448056830057 0.0404436222384257 0.00863073731917112 0.0284421612562986
0.0267363207292114 0.0149737944091246 0.0354194336440806 0.0279625792944923

```
0.0383514432065766 0.0352825102072709 0.0478707660761155 0.0249882502634932
0.0202331490258836 0.0344645799745789 0.0170699261063785 0.0260904765333424
0.0351782665863022 0.0307661771651652 0.0124682482051683 0.0335923328021248
0.0181758332249935 0.0264161014724391 0.0279787022573275 0.007535826057081
0.0307298598072396 0.0426317774429447 0.0266615983287314 0.0461889919177949
0.0314279510572108 0.0343412292647684 0.0259583221580998 0.0443309160025095
0.03157539118113 0.0423766834987417 0.0437221391862072 0.035336483981612 0.0289735267217834
0.030808173443449 0.0268506158888573 0.0209843336723531 0.0285290585070789
0.0381741700350245 0.0262026168396676 0.0264189311256493 0.0298349006141292
0.0309695152297737 0.0180654359167147 0.0240322093043656 0.0316329074842478
0.00347737568536327 0.0229359654831048 0.0136518367218131 0.0453786850282774
0.0328641471562058 0.0232667239181436 0.0262123151012275 0.0225726980226791
0.00442888362548046 0.0166025650769297 0.0316198233868972 0.0388144527561284
0.0442222324483322 0.0328821911760882 0.0447991622528462 0.0204152544751636
0.0556863808562711 0.0454363864970411 0.0287618451419525 0.0442332059251056
0.0254214797650289 0.0315686348085683 0.0138627304941362 0.0164705351694428
0.0336222951861581 0.0257284411444209 0.0199502299153125 0.0386006662990374
0.0417355696134105 0.0278142863192104 0.0375884900355188 0.0331559485894479
0.0116824485014162 0.0300295730879692 0.0405010921443187 0.0310410282227526
0.0293214379645158 0.0436095999656375 0.0345462681505592 0.0281155873343074
0.0251238745704039 0.0238307055708844 0.0271907785365612 0.03149383613282
0.0425412768087118 0.0298262231711111 0.0341912813965337 0.0235590571383934
0.033218111195397 0.0253324565151752 0.0267720720086282 0.0280037755987722
0.0357244343609365 0.0289988993792955 0.0164786212757693 0.0192465493480172
0.0153778085973292];

%Media da populacao
MUpop = sum(Distr)/NumRuns;

%Desvio padrao da populacao
SIGMApop = sqrt(sum((Distr-MUpop).*(Distr-MUpop))/(NumRuns-1));

%Histograma com 50 bins
[FREQ,Distrbins] = hist(Distr,50);
FREQ = 100 * FREQ/sum(FREQ);

%Distancia entre duas barras
dx = Distrbins(2) - Distrbins(1);

%Area de todas as barras
AREA = sum(FREQ) * dx;
```

```
%Valor mínimo do histograma
Xmin = min(Distr);

%Valor maximo do histograma
Xmax = max(Distr);

%Diferenca entre os valores minimo e maximo do histograma
L = Xmax-Xmin;

%Folga no valor minimo do histograma
Xmin = Xmin - L*0.1;

%Folga no valor maximo do histograma
Xmax = Xmax + L*0.1;

%Vetor de 1000 pontos no intervalo do histograma
X = linspace(Xmin, Xmax, 1000);

%Vetor para montar a curva da distribuicao normal (MU, sigma) ao longo do vetor X
Y = AREA *pdf('normal',X,MUpop,SIGMApop);

%Vetor vazio para escrever legenda
stx = [];

%Plotar histograma
figure(1)
bar(Distrbins,FREQ,1,'c');
stx = strvcat(stx,'Histograma Especificado');
hold on

%Especificacao Maxima
EspecMax = 0.03;

%Valores nao especificados
iX = find(Distrbins > EspecMax);

%Valores especificados
Esp = find(Distr < EspecMax);
%Tamanho do vetor de valores especificados
nEsp = length(Esp);
% % de Aprovacao
app = 100 * (nEsp / NumRuns);
```

```
if isempty(iX)
else
        bar(Distrbins(iX),FREQ(iX),1,'y');
        stx = strvcat(stx,'Histograma Nao Especificado');
end

plot(X,Y,'-r','linewidth',3);
stx = strvcat(stx,'Normal PDF Ajustada');
legend (stx, 'location','northwest');;
grid on
xlabel ('FracaoMolarCO2GNfinal','fontsize',12,'fontweight','bold','fontangle','italic');
ylabel ('Frequencia %','fontsize',12,'fontweight','bold','fontangle','italic');
title (['Populacao de FracaoMolarCO2GNfinal, N = ' int2str(NumRuns) ', Aprovacao = ' num2str(app) '
% , Media da Populacao = ' num2str(MUpop) ' , DP da Populacao = ' num2str(SIGMApop)],
'fontsize',12,'fontweight','bold','fontangle','italic');
```