

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CLEIDSON LUIS SILVA SOUZA

DESENVOLVIMENTO DE UM *SOFTWARE* PARA CÁLCULO DA VELOCIDADE DO SOM NO GÁS NATURAL PARA USO EM DIAGNÓSTICO DE MEDIDORES DE VAZÃO ULTRASSÔNICOS.

São Luís – MA
2017

CLEIDSON LUIS SILVA SOUZA

DESENVOLVIMENTO DE UM *SOFTWARE* PARA CÁLCULO DA VELOCIDADE DO SOM NO GÁS NATURAL PARA USO EM DIAGNÓSTICO DE MEDIDORES DE VAZÃO ULTRASSÔNICOS.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão para o grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof. Dr. Lourival Matos de Sousa Filho

São Luís – MA
2017

Souza, Cleidson Luis Silva.

Desenvolvimento de um software para cálculo da velocidade do som no gás natural para uso em diagnóstico de medidores de vazão ultrassônicos / Cleidson Luis Silva Souza. – São Luís, 2017.

103

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Lourival Matos de Sousa Filho.

1. Gás natural. 2. Medidores ultrassônicos. 3. Velocidade do som.

I. Título.

CDU 004.4:681.121

CLEIDSON LUIS SILVA SOUZA

DESENVOLVIMENTO DE UM *SOFTWARE* PARA CÁLCULO DA VELOCIDADE DO SOM NO GÁS NATURAL PARA USO EM DIAGNÓSTICO DE MEDIDORES DE VAZÃO ULTRASSÔNICOS.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: / /

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Lourival Matos de Sousa Filho (Orientador)

Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Msc. Lourival Coelho Paixão

Mestre em Engenharia Mecânica
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Glauber Cruz

Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Federal do Maranhão

DEDICATÓRIA

A Deus todo poderoso, a minha família pelo incentivo e compreensão pelos momentos de ausência e ao Professor Msc. Carlos Antônio Angelim de Menezes por tudo que me ensinou.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por nos ter concedido, através de sua infinita bondade, o potencial de concretizar mais uma conquista em minha vida. Aos meus pais, Luiz Vieira de Souza e Maria Zuleide da Silva, por sempre me apoiarem e me ajudarem nos meus objetivos.

RESUMO

Os medidores de vazão ultrassônicos utilizados para medição do volume de gás natural disponibilizam diversos meios de diagnósticos para análise do bom funcionamento do instrumento. Um dos parâmetros de análise nos diagnósticos é a comparação da velocidade do som medida no processo pelo medidor de vazão com a velocidade do som calculada, utilizando os métodos matemáticos da norma internacional AGA 10. Porém, realizar o cálculo da velocidade do som por esse método é extremamente complexo, pois depende de várias interações numéricas e são extremamente sensíveis as variações da composição do gás, da temperatura e da pressão fluido. Esse trabalho tem como objetivo desenvolver métodos automatizados que possam receber os parâmetros de processo (temperatura, pressão e composição do gás) e consiga calcular com precisão a velocidade do som no gás natural, com o objetivo principal de ser utilizado nos processos de análise de diagnósticos dos medidores de vazão ultrassônicos.

Palavras-Chave: Velocidade do som, gás natural, medidores ultrassônicos

ABSTRACT

The ultrasonic flowmeters used to measure the volume of natural gas provide various means of diagnostics to analyze the proper functioning of the instrument. One of the parameters of analysis in the diagnostics is the comparison of the sound velocity measured in the process by the flow meter with the calculated velocity of sound, using the mathematical methods of the international standard AGA 10. However, to calculate the speed of sound by this method is extremely complex as it depends on various numerical interactions and the variations of the gas composition, temperature and fluid pressure are sensitive extremes. This work aims to develop automated methods that can receive the process parameters (temperature, pressure and gas composition) and can accurately calculate the speed of sound in natural gas, with the main objective of being used in the processes of analysis of diagnoses of ultrasonic flowmeters.

Key words: Sound velocity, natural gas, ultrasonic meters

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AGA – *American Gas Association*

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Combustíveis

ERPM – Estação de Regulagem de Medição e Pressão

GASMAR – Companhia de Gás Natural do Maranhão.

GN – Gás Natural

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

SOS – Velocidade do som

LISTA DE ABREVIATURAS

.xls – Arquivo de Excel.

.csv - *Comma-separated values*.

LISTA DE SÍMBOLOS

a_n - Constante [ad]

A - Área [m²]

b_n - Constante [ad]

B - Segundo coeficiente viral [ad]

B_{nij}^* - Coeficiente de caracterização binário [ad]

c_n - Constante [ad]

C_s - Velocidade do som [m/s]

CF - Fator de conversão [ad]

C_p - Capacidade calorífica a pressão constante do gás real [kJ/kg-K]

C_v - Capacidade calorífica a volume constante do gás real [kJ/kg-K]

C_n^* - Coeficiente em função da composição do gás [ad]

d - Densidade molar [moles/dm³]

D - Densidade Reduzida [moles/dm³]

E - Parâmetro de energia [K]

E_i - Parâmetro de energia característico para o componente i [ad]

E_j - Parâmetro de energia característico para o componente j [ad]

E_{ij} - Parâmetro de energia binária para o segundo coeficiente viral [ad]

E_{ij}^* - Parâmetro de interação da energia binária e segundo coeficiente viral [ad]

f_n - Constante [ad]

F - Parâmetro de mistura para alta temperatura [ad]

F_i - Parâmetro de temperatura para o componente i [ad]

F_j - Parâmetro de temperatura para o componente j [ad]

g_n - Constante [ad]

G - Parâmetro de orientação [ad]

G_i - Parâmetro de orientação para o componente i [ad]

G_j - Parâmetro de orientação para o componente j [ad]

G_{ij} - Parâmetro de orientação binária [ad]
 G_{ij}^* - Interação binária para o parâmetro de orientação [ad]
 k_n - Constante [ad]
 K - Parâmetro de mistura $[(m^3/kg\text{-mole})^{1/3}]$
 K_i - Parâmetro do tamanho para o componente i [ad]
 K_j - Parâmetro do tamanho para o componente j [ad]
 K_{ij} - Parâmetro do tamanho para interação binária ij [ad]
 L - Distância entre o transdutor T1 e transdutor T2 [m]
 M_r - Massa molar [kg/kg* mol]
 N - Número de componentes na mistura do gás [ad]
 P_b - Pressão na condição-base [psi]
 P_p - Pressão nas condições de processo [psi]
 q_n - Constante [ad]
 Q_v - Vazão instantânea [m^3/s]
 Q - Parâmetro quadrupolo [ad]
 Q_i - Parâmetro quadrupolo para o componente i [ad]
 Q_j - Parâmetro quadrupolo para o componente j [ad]
 R - Constante universal dos gases [J / mol^*K]
 s_n - Constante [a]
 S_i - Parâmetro dipolo para o componente i [ad]
 S_j - Parâmetro dipolo para o componente j [ad]
 t - Tempo de transito [s]
 t_{12} - Diferença de tempo entre o tradutor T1 e T2 [s]
 t_{21} - Diferença de tempo entre o tradutor T2 e T1 [s]
 T - Temperatura absoluta do gás [$^{\circ}K$]
 T_b - Temperatura na condição-base [$^{\circ}K$]
 T_p - Temperatura nas condições de processo [$^{\circ}K$]
 u_n - Constante [ad]
 U - Parâmetro de energia na mistura [a]
 v - Velocidade [m/s^2]
 V_b - Volume na condição-base [m^3]
 V_p - Volume nas condições de processo [m^3]

W – Velocidade do som pela AGA10 [m/s]

w_n - Constante [ad]

W_i - Parâmetro de associação para o componente i [ad]

W_j - Parâmetro de associação para o componente j [ad]

x_i - Fração molar do componente i [%]

x_j - Fração molar do componente j [%]

Z - Fator de compressibilidade detalhado [ad]

Z_b - Fator compressibilidade na condição-base [ad]

Z_p - Fator compressibilidade nas condições de processo [ad]

$\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_d$ - Derivada parcial de Z em relação a T com densidade constante [ad]

$\left(\frac{\partial^2 Z}{\partial T^2}\right)_d$ - Segunda derivada parcial de Z em relação a T com densidade constante [ad]

$\left(\frac{\partial Z}{\partial \rho}\right)_T$ - Derivada parcial de Z em relação a ρ com densidade constante [ad]

$\left(\frac{\partial B}{\partial T}\right)_d$ - Derivada do Segundo Coeficiente Viral em relação a T com d constante [ad]

$\left(\frac{\partial^2 B}{\partial T^2}\right)_d$ - Derivada do Segundo Coeficiente Viral em relação a T com d constante [ad]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1.Problemas de pesquisa	16
1.2.Justificativa	17
1.3.Objetivo	17
1.3.1.Objetivo geral	17
1.3.2.Objetivos específicos	17
2. REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1. Distribuição de gás natural	19
2.1.2. ERPM	20
2.2. Medição de gás natural	21
2.3. Cálculo do volume consumido	22
2.4. Incerteza de medição	24
2.4.1. GUM	26
2.5. Medidor de vazão	26
2.5.1. Incerteza nos medidores de vazão	26
2.6. Medidores de vazão ultrassônicos	27
2.6.1. Diagnósticos	30
2.6.2. Velocidade do som	32
2.6.2.1. Cálculo da velocidade do som pela AGA 10	32
3. METODOLOGIA	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5. CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS	53
ANEXOS	55
APÊNDICE	63

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o gás natural (GN) tem se tornado um importante insumo energético com participação crescente na matriz energética nacional. As qualidades e vantagens frente às outras fontes de energia fomentaram as aplicações industriais, domiciliares e automotivas do gás natural, notadamente nos grandes centros urbanos e industriais das regiões Sul, Sudeste e Nordeste. Com efeito, somente o volume de gás transportado através de tubulações em terra já ultrapassa os 22 milhões de metros cúbicos por dia (KAWAKITA. 2007).

Para chegar ao consumidor final, o gás natural passa por uma série de etapas que vão desde a exploração da jazida, passando pela produção, processamento, transporte, e chegando finalmente à distribuição. Nesse caminho, que se assemelha ao percurso do sangue através das artérias e capilares do corpo humano, o gás é comprimido, processado e transportado ao longo de centenas de quilômetros de tubulações que compõem as malhas de gasodutos que cruzam fronteiras de estados e de municípios, passando por estações de regulação e medição até chegar às distribuidoras e seus consumidores. Na fase de distribuição, o gás já deve estar atendendo a padrões rígidos de especificação, e praticamente isento de contaminantes para não causar problemas aos equipamentos onde será utilizado como combustível ou matéria-prima (KAWAKITA. 2007).

Por se tratar de um processo que requer um grande custo de produção, a distribuição de GN deve ser realizada de maneira a ter mínimas perdas durante o processo de distribuição. Onde o meio ideal seria a cobrança monetária exata de todo volume de gás natural consumido por todos os clientes.

No entanto, a medição do volume de gás natural é um processo que depende de vários fatores que ocasionam a influência de incertezas e desvios em seu resultado final. Assim, quase todo o volume de gás natural distribuído gerar incertezas em sua medição.

Para solucionar esse problema vários estudos e normas relacionados à incerteza de medição de gás natural são realizados constantemente para manter os desvios dos volumes de GN distribuído dentro de uma faixa de incerteza apropriada.

1.1.Problemas de pesquisa

O processo de maior importância na distribuição está relacionada a medição/contabilização dos volumes de gás natural distribuído a cada cliente. Para garantir uma medição adequada e com menores incertezas possíveis, o processo de medição conta com uma série de instrumentos de automação que registram em uma média de segundo a segundo todos os parâmetros (pressão, temperatura, composição química) do gás natural que são necessários para cálculo adequado do volume que será faturado para cada cliente.

Dentre os instrumentos que são utilizados nos processos de medição de GN, os medidores de vazão são uns dos mais importantes, pois é a partir dos dados gerados por esse equipamento que serão calculados o volume a ser faturado por uma empresa de distribuição de gás natural (*DELMEE. 2003*).

Por se trata de um instrumento de suma importância e que causa grande impacto financeiro no processo de medição de gás natural, os medidores de vazão devem ser analisados periodicamente para avaliar se os instrumentos não estão realizando medições com desvios maiores do que o permitido por normas ou pelo fabricante do produto (*DELMEE. 2003*).

Um instrumento de medição de vazão para gás natural que vem ganhando mercado durante os últimos anos é o medidor de vazão ultrassônico. Uma vantagem que esse medidor apresenta em relação a outros instrumentos similares é a possibilidade de se autodiagnosticar e gerar relatórios com dados calculados pelo próprio medidor. Assim, é possível realizar verificações dos dados calculados pelo equipamento e de dados calculados por operados e então verificar se o instrumento apresenta desvios que possam prejudicar o cálculo de vazão que está sendo medido pelo equipamento.

Um parâmetro que é bastante usado nos diagnósticos dos medidores de vazão ultrassônicos para avaliação de desvios de medição é a comparação da velocidade do som medida pelo medidor de vazão ultrassônico com a velocidade do som calculada, utilizando o método de cálculo da norma internacional AGA 10 (PUC – RIO, 2017). Pois o erro na velocidade do som pode levar ao um erro na velocidade de escoamento que conseqüentemente causa um erro na vazão medida pelo instrumento.

Realizar o cálculo da velocidade do som pelo método da AGA 10 é extremamente complexo, pois depende de vários métodos numéricos e é sensível as variações de alguns parâmetros (composição, temperatura e pressão) do gás natural.

1.2.Justificativa

As incertezas geradas por instrumentos que auxiliam no cálculo do volume de GN consumido é um dos processos mais avaliados em pesquisas relacionadas à medição de gás natural. O desenvolvimento de métodos que possam facilitar a análise de desvios e incertezas nos equipamentos que auxiliam a medição de gás natural possibilita uma melhor avaliação das taxas de erro na contabilização do volume de GN faturado aos clientes.

1.3.Objetivo

1.3.1.Objetivo geral

O objetivo desse trabalho é o desenvolvimento de métodos automatizados que recebam os parâmetros do processo de medição (pressão, temperatura e composição química) de uma estação de distribuição de gás natural e calcule o valor da velocidade do som no fluido.

1.3.2.Objetivos específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

1. Desenvolver um algoritmo em VBA que calcule a velocidade do som no gás natural para ser utilizado no software Excel.
2. Desenvolver um software para desktop em C/C++ com interface gráfica.

3. Desenvolver um sistema para a companhia de Gás Natural do Maranhão - GASMAR que se comunique automaticamente com os dados dos instrumentos, relacionados ao módulo de medição de gás natural, e realize cálculos da velocidade do som no GN a partir de um tempo t definido pelo usuário. O sistema será usado para os processos de verificação de desvios de 6 medidores de vazão ultrassônicos utilizados pela empresa nas linhas de distribuição de Gás Natural da Usina Termoelétrica Parnaíba IV, localizada em Santo Antônio dos Lopes – MA.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O gás natural é um combustível largamente utilizado nas indústrias devido a inúmeras vantagens dentre outros combustíveis, talvez a principal delas seja a baixa emissão de poluentes na atmosfera quando comparado a outras fontes de energia como carvão mineral e óleo diesel. As indústrias que consomem este gás, logicamente são oneradas por isso. Daí a importância da medição de vazão do gás na entrada desses locais (BARBOZA. 2013).

Segundo a ABGÁS (Associação Brasileira das Empresas de Distribuição de Gás Canalizado), o consumo de gás natural no Brasil vem crescendo a uma média anual de 12,5% desde a entrada em operação do gasoduto Bolívia-Brasil, em 1999. O crescimento do consumo inicialmente apoiou-se no setor industrial, o qual apostou no gás natural como o combustível por excelência para aumentar a qualidade de seus produtos, competir no mercado internacional e reduzir as emissões ambientais. A ABGÁS ainda afirma que no período 2012-2014, o consumo de gás na geração de eletricidade duplicou, em virtude do período hidrológico desfavorável, com o consequente acionamento do parque de usinas termelétricas a gás natural.

Apesar de o GN apresentar poucas transformações ao longo da cadeia de produção, o processo que envolve levar o gás do poço exploratório até o consumidor final é bastante complexo e custoso. A cadeia de produção é dividida em dois grandes blocos. O primeiro bloco, chamado de *upstream*, agrega as atividades relacionadas com a aquisição do produto em si, como exploração e produção, já o

segundo, conhecido como *downstream*, relaciona-se com as atividades de aplicações do produto e focaliza-se no transporte e distribuição de gás natural até o consumidor final (PINTO JR. 2007).

2.1. Distribuição de gás natural

O gás natural se mostra uma energia moderna de grande versatilidade, podendo ser utilizada amplamente em diversos segmentos do mercado sendo largamente utilizado nas indústrias, no comércio, nas residências, automóveis e setores termoelétricos. Por levar conforto, economia, comodidade e segurança para a sociedade, torna-se uma energia altamente desejável para o mercado nos seus mais variados processos produtivos (GASMAR, 2017).

Para realizar a distribuição desse produto aos consumidores finais, o GN passa por uma série de etapas que vai desde a exploração dos poços de produção até a montagem de uma rede de distribuição que realiza o seu transporte. Na etapa de distribuição, o gás natural deve atender aos padrões rígidos de especificações e estar praticamente isento de impurezas, para assim não causar problemas aos equipamentos que terão como combustível o gás natural.

A segurança intrínseca do transporte de gás natural dá-se através do projeto e construção de gasodutos e redes de distribuição de acordo com normas internacionais, de modo a garantir a segurança do empreendimento e conseqüentemente das comunidades envolvidas (CASTELANI. 2003).

Dependendo do setor para onde será distribuído o gás natural, são montadas gasodutos onde serão avaliados o melhor custo benefício. Nos processos onde há necessidade de ser manter pressões e temperaturas adequadas de trabalho, onde o GN deve ser constantemente limpo de impurezas e normalmente há grande vazão, são montadas estruturas chamadas de Estação de Regulagem de Pressão e Medição (ERPM), onde realizam etapas para garantir uma distribuição segura e adequada do GN aos consumidores. Principalmente no setor termoelétrico e industrial uma ERPM é o principal ponto entre o local de coleta do gás natural e o cliente.

2.1.2. ERPM

As estações de regulação de pressão e medição têm a função de proteger e garantir a estabilidade do sistema. São compostas por um sub-sistema de redução de pressão e um sub-sistema de medição (CASTELANI. 2003).

Uma ERPM é montada em módulos, que realizam funções específicas no processo de distribuição de gás natural, e normalmente apresenta a seguinte divisão: Módulo de segurança, módulo de filtragem, módulo de regulação de pressão e módulo de medição. A Figura 1 mostra o esquema típico de uma ERPM.

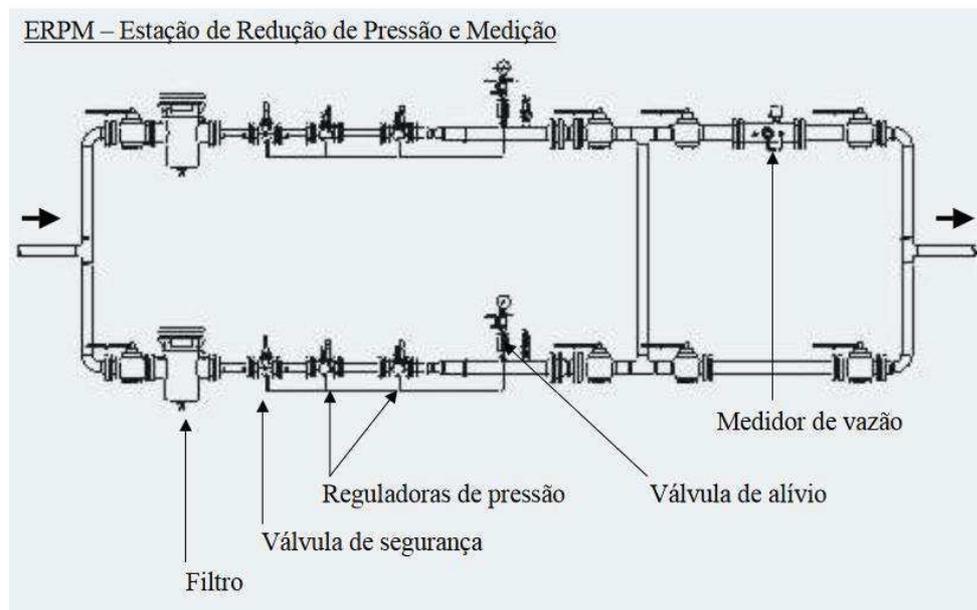


Figura 1 - Estação de Regulação de pressão e medição

Fonte: Dissertação de Mestrado - MÁRCIO RICARDO

Cada módulo de uma ERPM é composto por determinados equipamentos e são responsáveis por uma função específica no processo de distribuição de GN, a saber (GASMAR. 2017):

- a) Módulo de segurança: Normalmente composto por válvulas de bloqueio que são responsáveis por impedir a passagem de gás natural para o resto da linha de distribuição caso haja necessidade.

- b) Módulo de filtragem: Composto principalmente por válvulas de passagem e o filtro. Tem a função de limpar o gás natural de suas impurezas.
- c) Módulo de regulação de pressão: Composto por válvulas que atuam na redução ou aumento da pressão do gás natural. Esse módulo é responsável por manter a pressão do gás de acordo com a especificação dos equipamentos dos clientes que terão o GN como combustível.
- d) Módulo de Medição: Os principais instrumentos que compõe esse módulo são os transmissores de pressão, transmissores de temperatura, medidor de vazão. Os equipamentos desse módulo são responsáveis pela transmissão de dados que serão usados para cálculo do volume de gás natural consumido pelos clientes.

2.2. Medição de gás natural

A medição do gás natural é baseada em uma combinação de leis da física, da química, da engenharia e do balanço de massa, e não é uma ciência exata. É uma ciência aplicada, que muda com as alterações da tecnologia, negócios e meio ambiente (KAWAKITA. 2007).

Na distribuição de GN um dos processos mais importante é a medição do volume consumido pelos clientes. Isso se dar principalmente pelo fato de ser nessa etapa que as concessionárias de gás natural retiram todo seu faturamento. Assim, se houver erros nesse processo a empresa pode sofrer perdas em seu lucro ou acabar tendo a imagem manchada por realizar cobranças indevidas aos seus clientes (DELMEE. 2003).

Quando tratamos de atividades de distribuição de gás natural onde o principal ponto para a medição é em uma ERPM todo o processo que contabiliza o GN consumido pelo cliente é realizado no módulo de medição. Esse módulo é constituído por um conjunto de instrumentos de automação dedicados a medição das características físico-química de um fluido, tais como: transmissores de campo (vazão, temperatura e pressão), medidores de compostos químicos (cromatógrafo) e equipamento destinado a realizar análises e armazenamento de dados (computadores de vazão). A Figura 2 apresenta a configuração básica de um sistema de medição de gás natural.

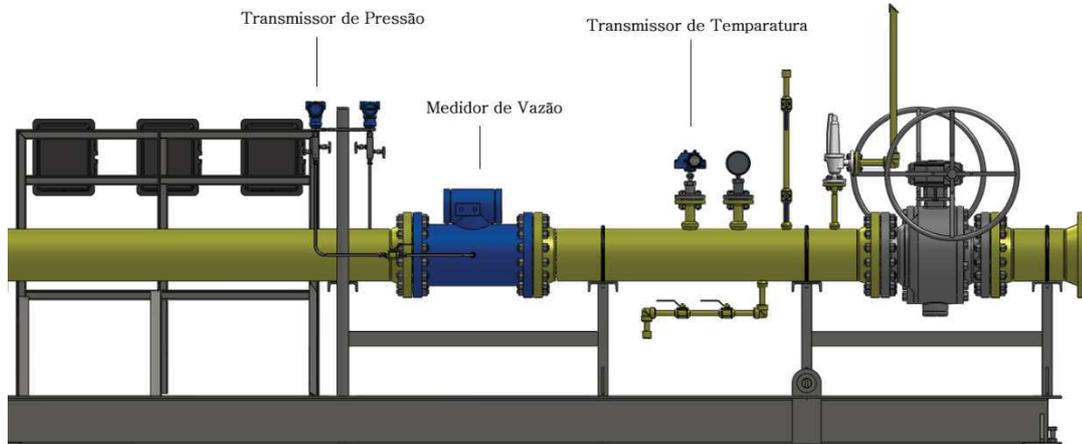


Figura 2 - Esquema do sistema de medição de Gás Natural

Fonte: Próprio Autor (2017)

As regras específicas sobre a medição dos volumes e da composição do gás natural foram determinadas através da Portaria Conjunta nº 1 ANP/Inmetro, de 19 de junho de 2000, que aprova o Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás Natural, estabelecendo as condições e requisitos mínimos para os sistemas de medição de petróleo e gás natural, com vistas a garantir resultados acurados e completos (ANP. 2013).

2.3. Cálculo do volume consumido

De acordo com a Portaria Conjunta nº 1 ANP/Inmetro. De 19 de junho de 2013, o m³ de gás natural consumido deve ser calculado a uma pressão base de 101,325 Kpa (1 atm), temperatura de 20° C e o poder calorífico de 9.580 kcal/m³. Caso não possam ser definidas essas condições no processo de distribuição, todo o volume calculado deve ser convertido para essas especificações (ANP. 2013).

Manter as condições especificadas nas linhas de distribuição é extremamente difícil. As variáveis (temperatura, pressão e composição do GN) de processo mudam constantemente, sejam por condições ambientais ou devido às condições de

especificações de trabalho dos equipamentos do cliente. Assim, todo o volume calculado na linha de distribuição é considerado um volume bruto, volume medido fora das condições especificadas pela ANP, e antes de ser faturado ao cliente deve ser convertido para as condições de base especificadas pela ANP/Inmetro.

No Brasil, a norma da ABNT - NBR 16107, fator de conversão do volume de gás natural, estabelece métodos para contabilizar o volume de GN consumido. De acordo com essa norma a relação entre o volume de GN bruto medido na linha de distribuição e o volume na condição-base, volume que é consumido por determinado cliente, é dado pela Equação 1 (ABNT. 2013):

$$V_b = V_o \times CF \quad \text{Eq.(1)}$$

O valor de CF pode ser calculado pela equação Equação 2:

$$CF = \frac{V_b}{V_p} = \frac{P_p}{P_b} \times \frac{T_b}{T_p} \times \frac{Z_b}{Z_p} \quad \text{Eq.(2)}$$

Em um ERPM, os valores de V_o , P_p , T_p e Z_p são gerados, respectivamente, pelo medidor de vazão, transmissor de pressão, transmissor de temperatura e medidor de composto químico (cromatógrafo) do módulo de medição das linhas de distribuição de gás natural.

Pelas Eq.(1) e Eq.(2) pode ser observado que o volume faturado por uma distribuidora de gás natural é diretamente afetado pelos valores transmitidos nos instrumentos do módulo de medição. Assim, pode-se analisar que a precisão dos instrumentos de campo (vazão, temperatura e pressão) devem apresentar baixas incertezas e grande confiabilidade.

2.4. Incerteza de medição

A incerteza é um parâmetro associado com o resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão do valor que poderia razoavelmente ser atribuído ao mensurando (valor convencional), caracterizando o intervalo no qual estão os valores que poderão ser atribuídos razoavelmente ao mensurando com um determinado nível de confiança (Paulo Andrade. 2006).

O objetivo da avaliação da incerteza de medição é modelar estatisticamente o sistema ou processo de medição, incluindo a quantificação das grandezas de entrada (*input quantities*) e a natureza das suas inexatidões, e determinar o resultado do modelo (*output quantity*), quantificando a extensão e natureza da sua exatidão. Um requisito essencial é associar ao valor da mensuranda um intervalo de confiança que contenha o resultado da medição, que é a melhor estimativa do resultado numérico obtido, e que possa ser expectável que inclua uma determinada proporção, 95% na maioria dos casos, da distribuição dos valores que podem razoavelmente ser atribuídos à mensurada (JOÃO ALVES. 2007).

A incerteza de medição na contabilização do gás natural está associada principalmente a erros gerados por quatro instrumentos no módulo de medição: Medidor de vazão, transmissor de temperatura, transmissor de pressão e cromatógrafo.

As avaliações de incertezas de medição na área de petróleo e gás natural devem seguir, naturalmente, a metodologia descrita no Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (*ISO GUM*). O procedimento proposto pelo *ISO GUM* para a estimativa da incerteza de medição consiste no cumprimento das seguintes etapas: definição do mensurando e seu modelo matemático, identificação das possíveis fontes de incerteza, quantificação das fontes de incerteza, redução das incertezas para uma forma padrão, combinação das incertezas padronizadas e os respectivos coeficientes de sensibilidade, declaração da incerteza expandida, do fator de abrangência e do nível de confiança (JOSÉ ALBERTO. 2010).

O Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (VIM) traz as seguintes definições de algumas incertezas que podem ser encontradas em instrumentos de medição de GN:

1. Incerteza padrão: incerteza do resultado de uma medição expressa como um desvio padrão;
2. Incerteza padrão do tipo A: incerteza padrão determinada pela análise estatística dos resultados;
3. Incerteza padrão do tipo B: incerteza padrão determinada por outros meios, como experiência anterior e laudos de calibração de padrões;
4. Incerteza padrão combinada: incerteza padrão do resultado de uma medição, quando este resultado é obtido por meio de valores de várias outras grandezas, sendo igual à raiz quadrada positiva de uma soma de termos, sendo estes as variâncias ou covariâncias destas outras grandezas, ponderadas de acordo com quanto o resultado da medição varia com mudanças nestas grandezas;
5. Incerteza expandida: grandeza definindo um intervalo em torno do resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que possam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando.

Ter um processo de medição de gás natural onde algum instrumento gera incertezas que não são avaliadas e são contabilizadas nos cálculos do volume consumido é certamente problemático e pode causar perdas de milhões de reais para uma empresa. Por isso, desenvolver métodos para avaliação de incertezas na medição de GN é um processo importante para as distribuidoras de gás natural.

A ANP define um valor máximo para a soma das incertezas geradas em todo processo de medição de gás natural, que varia dependendo do tipo de atividade de distribuição. Caso as incertezas calculadas sejam maiores que as especificadas pela ANP, o processo de medição deve ser reavaliado.

Tabela 1 - Erros e incertezas totais admitidos pela ANP

MÁXIMO VALOR DE ERROS E INCERTEZAS NA MEDIÇÃO DE GN	
Medição Fiscal	1,5 %
Transferência de Custódia	1,5 %
Apropriação	2,0%
Outros	3 %

Fonte: ANP – Portaria ANP/INMETRO Nº 1 de 10/6/2013

2.4.1. GUM

A Norma internacional *GUM, Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*, desenvolveu metodologias para verificação de incertezas de medição e seus métodos são utilizados para cálculo dos desvios gerados nos instrumentos de medição de gás natural.

2.5. Medidor de vazão

O medidor de vazão é um instrumento capaz de medir a massa (medidor de vazão mássica) ou o volume de um fluido (medidor de vazão volumétrica) que escoar em uma tubulação ou um canal em um determinado intervalo de tempo. A vazão poderá ser volumétrica (volume na unidade de tempo, usualmente representada por Q) ou mássica (massa na unidade de tempo, muitas vezes representada por \dot{m} ou M) (*DELMEE.2003*).

Apesar de ser uma das grandezas mais mensuradas na indústria, a medição de vazão não é um processo tão simples. Os medidores de vazão normalmente não são universais e seu uso depende das características do fluido que irão medir e das especificações do projeto por onde ocorrerá o seu escoamento. No Brasil, para a medição de gás natural devem ser utilizados medidores de vazão que obedecem aos regulamentos da ANP.

2.5.1. Incerteza nos medidores de vazão

A seleção de bons instrumentos para medir as variáveis de processo (Vazão, pressão, temperatura e composição) que são usados para cálculo da medição de gás natural é de grande importância.

Entre as variáveis medidas a vazão é a que requer os recursos tecnológicos mais diversos para o desenvolvimento de medidores e transmissores (*DELMEE. 2003*). Apesar disso, a medição de vazão não é realizada com exatidão, pois seu processo depende da influência de vários parâmetros.

Mesmo não sendo uma variável que apresenta medição exata, para cada medidor são definidas faixas de incertezas que são classificadas pelos fabricantes. Esse range é o limite de erro que cada instrumento pode apresentar em seu processo e caso esse limite não seja ultrapassado as incertezas geradas por esse equipamento na contabilização do volume de gás natural não são associados nos cálculos de medição.

No entanto, vários parâmetros podem gerar erros que ultrapassem a faixa limite estabelecida e assim causar incertezas que influenciam bastante o volume final do GN contabilizado no processo de medição. Entre esses parâmetros os que mais influenciam nos erros estão associados principalmente a calibração incorreta do instrumento, seleção inadequada do medidor na montagem da linha de distribuição e falta de análise periódica para verificação das faixas de erros estabelecidas pelo fabricante.

2.6. Medidores de vazão ultrassônicos

Existem dois tipos de medidores ultrassônicos: efeito Doppler e tempo de trânsito, este último sendo o mais usado. Em todos os medidores ultrassônicos, a energia elétrica é usada para excitar um cristal piezelétrico em sua frequência de ressonância. Esta frequência de ressonância é transmitida na forma de onda, viajando à velocidade do som, no fluido e no material onde o cristal está tocando. Normalmente, o medidor ultrassônico utiliza dois transdutores para envio e recebimento do sinal na linha, mas, dependendo da precisão necessária e do diâmetro da tubulação, pode-se utilizar 1, 4, 6 ou até 8 transdutores para fazer essa medição (CÂMARA. 2010).

O medidor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito é o mais usado para medição de gás natural e utiliza o efeito da diferença do tempo de propagação de pulsos ultrassônicos para a determinação da variável medida. Este princípio mede o efeito da velocidade do fluxo de um líquido através sinais acústicos bidirecionais. Os transdutores são normalmente instalados com ângulo θ (**Figura 3**). Um dos transdutores é instalado à montante do fluxo (T_1) que emite um sinal para um transdutor instalado à jusante do fluxo (T_2) que, por sua vez, emite um sinal em sentido contrário (**Figura 3**) (EMERSON. 2015)

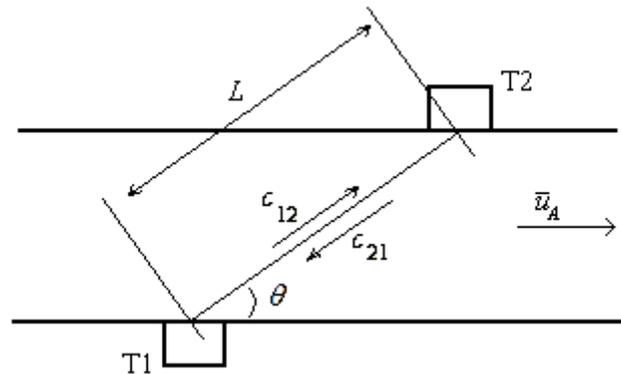


Figura 3 - Exemplo do funcionamento dos transdutores

Fonte: Manual da empresa Emerson – Distribuída para GASMAR

Quando não há fluxo, o tempo necessário para o sinal deslocar-se de T_1 a T_2 é o mesmo tempo que de T_2 a T_1 (CÂMARA. 2010).

Levando em consideração as leis da mecânica é possível determinar a velocidade (v) em cada corda, baseando-se nos princípios físicos, onde:

$$v = \frac{\text{distância (L)}}{\text{tempo (t)}} \quad \text{Eq.(3)}$$

A dificuldade de encontrar a velocidade está em determinar o tempo de transito entre cada par de transdutores. Levando em consideração que a velocidade medida do fluxo é proporcional à diferença de tempo entre o transdutor T_1 (t_{12}) e o transdutor T_2 (t_{21}), podemos utilizar as seguintes equações para o cálculo de (t_{12}) e (t_{21}).

$$t_{12} = \frac{d}{C + [V \times \text{Cos}\theta]} \quad \text{Eq.(4)}$$

$$t_{21} = \frac{d}{C - [V \times \text{Cos}\theta]} \quad \text{Eq.(5)}$$

Temos que o tempo total t é dado por:

$$t = t_{12} - t_{21}$$

Das equações 4 e 5:

$$t_{12} - t_{21} = \frac{L}{C + [V \times \text{Cos}\theta]} - \frac{L}{C - [V \times \text{Cos}\theta]}$$

$$\frac{t_{12} - t_{21}}{t_{12} \times t_{21}} = \frac{C + [V \times \text{Cos}\theta]}{L} - \frac{C - [V \times \text{Cos}\theta]}{L}$$

$$\frac{t_{12} - t_{21}}{t_{12} \times t_{21}} = \frac{2 \times V \times \text{Cos}\theta}{L} \quad \text{Eq.(6)}$$

Onde $\text{Cos}\theta = \frac{X}{L}$. Assim temos:

$$\frac{t_{21} - t_{12}}{t_{12} \times t_{21}} = \frac{2 \times V \times X}{L^2} \quad \text{Eq.(7)}$$

Resolvendo para velocidade V:

$$v = \frac{L^2}{2 \times X} \times \left(\frac{t_{21} - t_{12}}{t_{12} \times t_{21}} \right) \quad \text{Eq.(8)}$$

A velocidade do som C_s pode ser calculada por:

$$C_s = \frac{L}{2} \times \left(\frac{t_{21} + t_{12}}{t_{12} \times t_{21}} \right) \quad \text{Eq.(9)}$$

Em posse da velocidade, o cálculo da vazão Q_v pode ser facilmente encontrado, desde que conheça a área, pela Equação 10:

$$Q_v = v \times A \quad \text{Eq.(10)}$$

2.6.1. Diagnósticos

Uma excelente função dos medidores de vazão ultrassônicos está relacionada ao seu sistema de diagnóstico. Essa função tem como objetivo fazer com o equipamento se autoanalise e então gere relatórios demonstrando seus parâmetros de funcionamento, o que facilita a avaliação de erros que possam ser gerados por esse instrumento.

Os medidores de vazão ultrassônicos disponibilizam diversos parâmetros de diagnóstico, alguns comuns a todos os equipamentos, como relação sinal-ruído, ganho, velocidade do som e velocidade média em cada canal, mas outros são definidos em função do arranjo do medidor. Entre os parâmetros analisados nos diagnósticos estão (PUC-RIO, 2017).

1. Ganho: Os medidores dispõem de controle de ganho em cada canal do transdutor que aumenta com a diminuição da pressão, da velocidade, com a contaminação, deterioração do transdutor e obstrução das portas dos transdutores ou presença de líquido na linha.
2. Qualidade do Sinal: Os pulsos ultrassônicos são enviados de um transdutor ao outro, mas nem todos conseguem ser identificados na recepção e um número significativo é descartado. Qualidade do sinal é a relação entre pulsos aceitos e o total de pulsos enviados.
3. Relação Sinal-Ruído: A causa de nível elevado de ruído pode ser falha no aterramento ou na conexão elétrica entre transdutor e eletrônica, interferência eletromagnética ou de rádio frequência, interferência da proteção catódica, contaminação do transdutor ou problemas nos componentes eletrônicos da unidade de processamento. A causa mais comum para ruído elevado é a queda de pressão nas válvulas de controle ou nas válvulas redutoras de pressão
4. Perfil de Velocidade: O registro das velocidades em cada canal é utilizado na avaliação do desempenho quando questionado.
5. Velocidade do Som: Erro na velocidade do som leva a erro na medição de velocidade do escoamento e sua verificação é uma forma de conferir a medição de tempo.

A análise dos parâmetros para fins de diagnóstico é feita por comparação dos valores obtidos pelo medidor em operação com valores indicados pelo fabricante ou valores usualmente encontrados em outras instalações semelhantes ou, também, pelo acompanhamento de valores históricos (PUC-RIO. 2017).

Realizar diagnósticos nos medidores ultrassônicos, fazer comparativos com dados calculados e dados obtidos anteriormente no processo é de grande importância para a verificação do seu funcionamento. Diferenças mínimas de 1% podem significar que o instrumento apresenta algum erro e está fazendo cálculos incorretos do volume. Por isso, realizações diagnósticas são de extremamente importante e devem ser feitas frequentemente.

Um parâmetro que é bastante usado nos diagnósticos é a comparação da velocidade do som medida pelo medidor de vazão utilizando a Eq.(9) e a comparação com a velocidade do som calculada, utilizando o método de cálculo da norma internacional AGA 10. Pois o erro na velocidade do som pode levar a um erro na velocidade de escoamento. (PUC-RIO. 2017).

2.6.2. Velocidade do som

Como mencionado anteriormente, a velocidade do som, ou SOS (do inglês *Speedy of Sound*), pode ser utilizada como ferramenta de diagnóstico de diversas maneiras. Um destas maneiras é a comparação entre a velocidade do som medida e a velocidade do som calculada teoricamente. Além deste, podem ser realizadas outras 4 verificações, a saber (PUC – RIO. 2017):

1. Comparação entre os valores medidos em cada corda;
2. Comparação do valor médio com o valor de cada corda;
3. Comparação entre os valores medidos pelas cordas de comprimentos diferentes;
4. Comparação com funções definidas no medidor.

Apesar da velocidade do som ser um parâmetro muito utilizado nos diagnósticos, a realização do cálculo dessa variável é extremamente complexa, pois depende de vários cálculos numéricos e são extremamente sensível às variações de alguns parâmetros (Composição, temperatura e pressão) do gás natural.

2.6.2.1. Cálculo da velocidade do som pela AGA 10

A *American Gas Association (AGA)* desenvolveu um método matemático, encontrado de maneira empírica, para o cálculo da velocidade do som no Gás Natural. Segundo a AGA 10 a velocidade do som no gás natural e em hidrocarbonetos relacionados é dada por:

$$W = \left[\left(\frac{c_p}{c_v} \right) \left(\frac{R T}{M_r} \right) \left(Z + \rho \frac{\partial Z}{\partial \rho} \right) \right]^{0.5} \quad \text{Eq.(11)}$$

O valor de c_p e c_v podem ser calculados por:

$$c_p = c_v + \left(\frac{T}{\rho^2} \right) \frac{\left[\left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_\rho \right]^2}{\left[\left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_T \right]} \quad \text{Eq.(12)}$$

$$c_v = c_p^0 - R \left\{ 1 + T \int_0^\rho \left[\frac{T}{p} \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial T \partial \rho} \right) + \frac{2}{\rho} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \right] d\rho \right\} \quad \text{Eq.(13)}$$

O valor de c_p também pode ser calculado por:

$$c_p = c_v + R \frac{\left[Z + T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_\rho \right]^2}{\left[Z + \rho \left(\frac{\partial Z}{\partial \rho} \right)_T \right]} \quad \text{Eq.(14)}$$

A capacidade calorífica a pressão constante no gás ideal (c_p^0) é dada pela seguinte equação:

$$c_p^0 = B + C \left[\frac{\frac{D}{T}}{\sinh\left(\frac{D}{T}\right)} \right]^2 + E \left[\frac{\frac{F}{T}}{\sinh\left(\frac{F}{T}\right)} \right]^2 + G \left[\frac{\frac{H}{T}}{\cosh\left(\frac{H}{T}\right)} \right]^2 + H \left[\frac{\frac{J}{T}}{\cosh\left(\frac{J}{T}\right)} \right]^2 \quad \text{Eq.(15)}$$

Os valores das constantes B até J da Eq.(15) variam de acordo com o componente molar a ser calculado. O ANEXO A - COEFICIENTES DE CAPACIDADE CALORÍFICA, ENTALPIA E ENTROPIA apresenta uma tabela com os valores para essas variáveis levando em consideração os seus componentes.

A compressibilidade Z pode ser calculada, de acordo com a norma Internacional AGA 8, pela seguinte equação:

$$Z = 1 + \frac{DB}{K^3} - D \sum_{n=13}^{18} C_n^* T^{-u_n} + \sum_{n=13}^{58} C_n^* T^{-u_n} (b_n - c_n k_n D^{k_n}) D^{b_n} \exp(-c_n D^{k_n}) \quad \text{Eq.(16)}$$

A densidade reduzida é igual:

$$D = K^3 d \quad \text{Eq.(17)}$$

O parâmetro de mistura é dado por:

$$K^5 = \left[\sum_{i=1}^N x_i K_j^{\frac{5}{2}} \right]^2 + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N x_i x_j (K_{ij}^5 - 1) (K_i K_j)^{\frac{5}{2}} \quad \text{Eq.(18)}$$

O segundo coeficiente viral é expresso pela equação:

$$B = \sum_{n=1}^{18} a_n T^{-u_n} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j E_{IJ}^{u_n} (K_i K_j)^{\frac{3}{2}} B_{nij}^* \quad \text{Eq.(19)}$$

Onde:

$$B_{nij}^* = (G_{ij} + 1 - g_n)^{g_n} (Q_i Q_j + 1 - q_n)^{q_n} \left(F_i^{\frac{1}{2}} F_j^{\frac{1}{2}} + 1 - f_n \right)^{f_n} (S_i S_j + 1 - s_n)^{s_n} (W_i W_j + 1 - w_n)^{w_n} \quad \text{Eq.(20)}$$

O parâmetro de energia binária para o segundo coeficiente viral e o parâmetro de orientação binário são dados por:

$$E_{IJ} = E_{ij}^* (E_i E_j)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Eq.(21)}$$

$$G_{IJ} = \frac{G_{ij}^* (G_i + G_j)}{2} \quad \text{Eq.(22)}$$

O coeficiente C_n^* ($n = 13$ até $n = 58$) pode ser calculado pela equação:

$$C_n^* = a_n(G + 1 - g_n)^{g_n}(Q^2 + 1 - q_n)^{q_n}(F + 1 - f_n)^{f_n}U^{u_n} \quad \text{Eq.(23)}$$

Os valores de U, G, Q e F podem ser encontrados pelas equações abaixo:

$$U^5 = \left[\sum_{i=1}^N x_i E_i^{\frac{5}{2}} \right]^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j (U_{ij}^5 - 1)(E_i E_j)^{\frac{5}{2}} \quad \text{Eq.(24)}$$

$$G = \sum_{i=1}^N x_i G_i + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j (G_{ij}^* - 1)(G_i + G_j) \quad \text{Eq.(25)}$$

$$Q = \sum_{i=1}^N x_i Q_i \quad \text{Eq.(26)}$$

$$F = \sum_{i=1}^N x_i^2 F_i \quad \text{Eq.(27)}$$

A pressão absoluta deve ser calculada por:

$$Q = dRT \left[1 + Bd - D \sum_{n=13}^{18} C_n^* T^{-u_n} (b_n - c_n k_n D^{k_n}) D^{b_n} \exp(-c_n D^{k_n}) \right] \quad \text{Eq.(28)}$$

A primeira derivada parcial de Z em relação a T com densidade constante é dada por:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_d &= \frac{D}{K^3} \left(\frac{\delta B}{\delta T}\right)_d + D \sum_{n=13}^{18} u_n C_n^* T^{-(u_n+1)} \\ &\quad - \sum_{n=13}^{58} u_n C_n^* T^{-(u_n+1)} (b_n - c_n k_n D^{k_n}) D^{b_n} \exp(-c_n D^{k_n}) \end{aligned} \quad \text{Eq.(29)}$$

Onde:

$$\left(\frac{\delta B}{\delta T}\right)_d = - \sum_{n=1}^{18} a_n T^{-(u_n+1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j E_{IJ}^{u_n} (K_i K_j)^{\frac{3}{2}} B_{nij}^* \quad \text{Eq.(30)}$$

A segunda derivada parcial de Z em relação a T com densidade constante é dada por:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial T^2}\right)_d &= \frac{D}{K^3} \left(\frac{\delta^2 B}{\delta T^2}\right)_d - D \sum_{n=13}^{18} u_n (u_n + 1) C_n^* T^{-(u_n+2)} \\ &\quad + \sum_{n=13}^{58} u_n (u_n + 1) C_n^* T^{-(u_n+2)} (b_n \\ &\quad - c_n k_n D^{k_n}) D^{b_n} \exp(-c_n D^{k_n}) \end{aligned} \quad \text{Eq.(31)}$$

Onde:

$$\left(\frac{\delta^2 B}{\delta T^2}\right)_d = \sum_{n=1}^{18} u_n (u_n + 1) a_n T^{-(u_n+2)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j E_{IJ}^{u_n} (K_i K_j)^{\frac{3}{2}} B_{nij}^* \quad \text{Eq.(32)}$$

A primeira derivada parcial de Z em relação à ρ com temperatura constante é dada por:

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{\partial Z}{\partial \rho}\right)_T = K^3 & \left\{ \left[\frac{B}{K^3} - \sum_{n=13}^{18} C_n^* T^{-u_n} \right] \right. \\
 & + \sum_{n=13}^{58} C_n^* T^{-u_n} (-c_n k_n^2 D^{(k_n-1)}) D^{b_n} \exp(-c_n D^{k_n}) \\
 & + \sum_{n=13}^{58} C_n^* T^{-u_n} (b_n - c_n k_n D^{k_n}) b_n D^{(b_n-1)} \exp(-c_n D^{k_n}) \quad \text{Eq.(33)} \\
 & - \sum_{n=13}^{58} C_n^* T^{-u_n} (b_n \\
 & \left. - c_n k_n D^{k_n}) D^{b_n} (c_n k_n D^{(k_n-1)}) \exp(-c_n D^{k_n}) \right\}
 \end{aligned}$$

Os valores das constantes a_n , b_n , c_n , k_n , u_n , g_n , q_n , f_n , s_n e w_n variam de acordo com o número de interações. O ANEXO B - CONSTANTES PARA CÁLCULO DE Z PELO MÉTODO DETALHADO apresenta uma tabela que demonstra os valores de cada constante conforme o número de interações.

Os parâmetros de interação binária E_{ij} , U_{ij} , K_{ij} , G variam de acordo com as interações de ij e com o componente molar. O ANEXO C - PARÂMETROS DE INTERAÇÃO BINÁRIA apresenta uma tabela que demonstra os valores, para cada componente molar, dos parâmetros conforme as combinações entre as interações i e j .

Os valores para os parâmetros de caracterização M_r , E , K , G , Q , F , S e W variam de acordo com o número CID de interações e com o componente molar. O ANEXO D - PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO USADOS NO MÉTODO DE CÁLCULO DETALHADO DE Z e ANEXO E - OUTROS PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO USADOS NO MÉTODO DE CÁLCULO DETALHO DE Z apresentam as tabelas que demonstram os valores, para cada componente molar, dos parâmetros conforme os valores de CID.

Para a viabilidade da Eq.(11) é necessário que a composição do fluido obedeça às seguintes características:

Tabela 2 - Limites de viabilidade para uso do método de cálculo da AGA10

Quantidade	Range Normal	Range Expandido
Densidade Relativa	0.554 até 0.87	0.07 até 1.52
Fração Molar Metano (%)	45.0 até 100.0	0 até 100.0
Fração Molar Nitrogênio (%)	0 até 50.0	0 até 100.0
Fração Molar Dióxido de Carbono (%)	0 até 30.0	0 até 100.0
Fração Molar Etano (%)	0 até 10.0	0 até 100.0
Fração Molar Propano (%)	0 até 4.0	0 até 12.0
Fração Molar Butano (%)	0 até 1.0	0 até 6.0
Fração Molar Pentano (%)	0 até 0.3	0 até 4.0
Fração Molar Hexano (%)	0 até 0.2	0 até PO da água
Fração Molar Hélio (%)	0 até 0.2	0 até 3.0
Fração Molar Hidrogênio (%)	0 até 10.0	0 até 100.0
Fração Molar Monóxido de Carbono (%)	0 até 3.0	0 até 3.0
Fração Molar Argônio (%)	#	0 até 1.0
Fração Molar Oxigênio (%)	#	0 até 21.0
Fração Molar Água (%)	0 até 0.05	0 até PO da água
Fração Molar Sulfeto de Hidrogênio (%)	0 até 0.02	0 até 100.0

Fonte: Norma internacional AGA 10 (2003).

3. METODOLOGIA

As atividades desse trabalho foram separadas em duas etapas:

1. Desenvolvimento do Algoritmo;
2. Desenvolvimento dos produtos.

3.4. Desenvolvimento do algoritmo

Como o produto final trata-se de dois softwares que terão como base principal o cálculo da velocidade do som no gás natural a partir de dados de processo de medição fornecidos de uma estação de distribuição de GN, foi definida como primeira etapa a modelagem, desenvolvimento e verificação da funcionalidade de um algoritmo capaz de realizar essa tarefa. O algoritmo teve como base de cálculo os métodos matemáticos apresentados anteriormente no item 2.6.2.1 deste trabalho.

Para a modelagem do algoritmo foi utilizado a linguagem de programação VBA. A escolha dessa linguagem foi definida levando em consideração os seguintes fatores:

1. A maioria dos medidores de vazão ultrassônicos emitem os relatórios de diagnósticos em extensão compatível com esse software (.xls ou .csv). O que facilitaria o processo de execução de entrada de dados no algoritmo, já que a linguagem VBA pode ser compilado no ambiente de programação do Excel.
2. O Excel é muito utilizado no meio industrial e pelas companhias de Gás Natural e há disponível diversos métodos, a partir de suplementos e drives programados, de automação que fazem conexão direta com esse software.
3. Um dos produtos desenvolvidos deverá ser executado diretamente do Excel 2007 ou superior.

3.5. Desenvolvimento dos produtos

Essa etapa focou no desenvolvimento de dois softwares que mesmo tendo uma base principalmente idêntica, cálculo da velocidade do som no GN, apresentam funcionalidades finais diferentes. Apenas por questão de nomenclatura os softwares foram separados em dois meios:

1. Software para distribuição;
2. Software dedicado.

3.5.1. *Software* para distribuição

Esse sistema teve como foco o desenvolvimento de um software com interface gráfica para distribuição livre e que fosse executável diretamente em qualquer computador que tenha o sistema operacional Windows XP ou superior. A modelagem dessa ferramenta acompanhou o esquema abaixo:

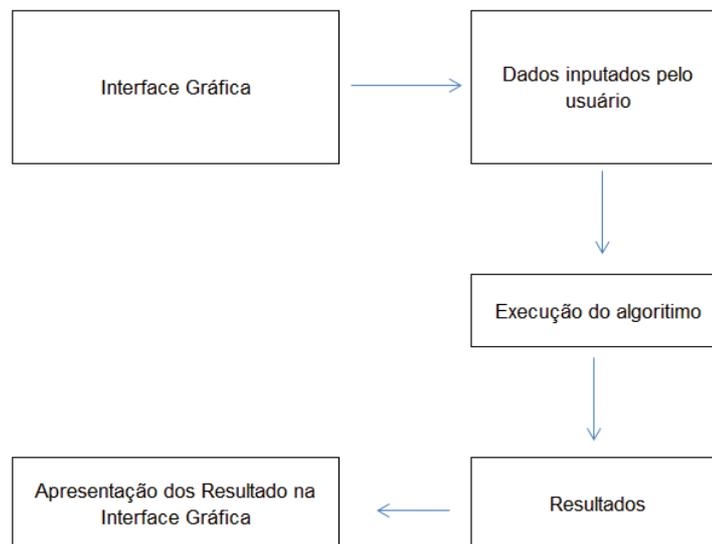


Figura 4 - Modelagem do *Software* para distribuição

Fonte: Próprio autor (2017)

3.5.2. *Software* dedicado

Esse sistema foi desenvolvido exclusivamente para o processo de avaliação de desvios e incertezas relacionados a 4 medidores de vazão ultrassônicos utilizados em uma das Estação de Regulagem de Pressão e Medição da Companhia de Gás Natural do Maranhão.

3.5.2.1. Medidores usados

Os quatros medidores utilizados como base para a modelagem e verificação de resultados desse *software* são do tipo tempo de transito da marca *Daniel* que possuem quatro pares de transdutores dispostos em posições radicais e em dois planos verticais distintos, como mostrado na Figura 5.



Figura 5 – Medidor de vazão utilizado

Fonte: GASMAR (2016)

3.5.2.2. Estrutura e avaliações para o sistema

Para o desenvolvimento dessa ferramenta foram avaliados as seguintes questões:

1. A avaliação dos diagnósticos, que normalmente são realizados no período de 1 hora, dos medidores de vazão ultrassônicos é gerada com pressão, temperatura e composição fixa durante todo o período. Já que a velocidade do som calculada no GN depende dessas 3 variáveis, isso gera incertezas no valor calculado pelo medidor, o que impossibilita ter confiabilidade nos dados gerados.
2. Devido a logística, pois os medidores de vazão ultrassônicos não são calibrados no Brasil, os instrumentos normalmente são calibrados no período de 2,5 anos, o que é previsto por norma e contrato com cliente (UTE Parnaíba IV). Por isso, deve haver métodos de avaliação que gerem relatórios que comprovem que os medidores atuam dentro da faixa limite de incerteza.
3. A empresa é constantemente auditada em relação a suas análises de incertezas relacionadas ao processo de medição. Assim, um sistema para análise dos medidores de vazão ultrassônicos seria útil na etapa de auditoria.
4. Não existem outros métodos na empresa para avaliar se os dados gerados pelos medidores de vazão ultrassônicos são confiáveis.

A modelagem da ferramenta desenvolvida para GASMAR seguiu o seguinte esquema:

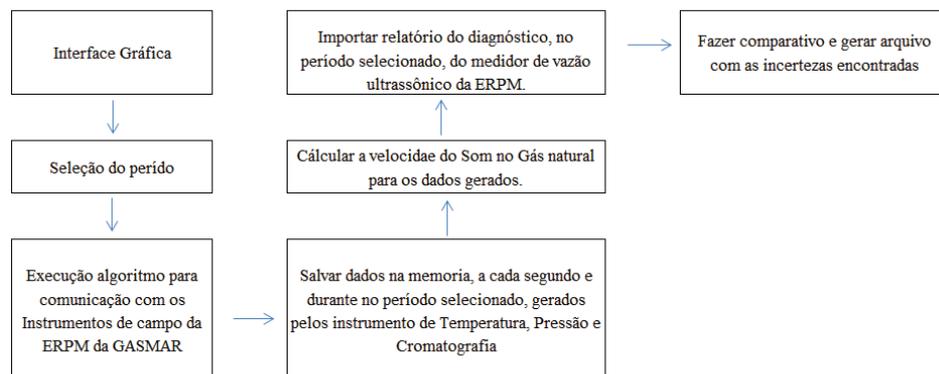


Figura 6 - Modelagem do Software para GASMAR

Fonte: Próprio autor (20017)

3.5.2.3. Comparativos

A base de comparação dos resultados desse software obedece o valor máximo definido pela norma internacional AGA 10, que define que a diferença entre a velocidade do som medida no medidor deve ser no máximo 0,2% da velocidade do som calculada, desde que mensurada nas mesmas condições de processo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussões obtidos em cada etapa do projeto são enunciados nessa seção.

4.4. Desenvolvimento e validação do algoritmo

Para resolver o modelo matemático empírico proposto pela AGA 10 para cálculo da velocidade do som no gás natural, foi desenvolvido um algoritmo que utiliza métodos de interações matemáticas para resolução da Equação 11. O resultado final do algoritmo, desenvolvido em VBA, pode ser encontrado no APÊNDICE 1 - ALGORITMO PARA CÁLCULO DA VELOCIDADE DO SOM NO GN.

A estrutura final do algoritmo, onde a função SOS recebe como parâmetros de entradas as condições de processo do gás natural, é mostrado conforme diagrama apresentado na Figura 7.

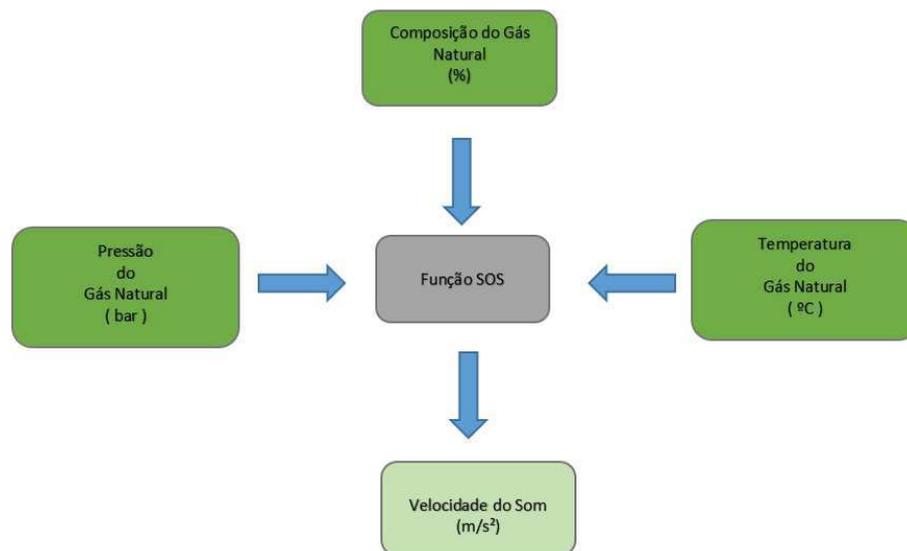


Figura 7 – Estrutura de entrada de dados do algoritmo

Fonte: Próprio autor (2017)

Para obtenção correta da velocidade do som no GN, utilizando o algoritmo desenvolvido, a composição deve ser composta pela porcentagem de 20 frações molares do gás e obedecer à ordem de entrada de dados mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 – Ordem de *input* de dados da composição do GN na função SOS

Ordem	Componente
1	Metano
2	Nitrogênio
3	Dióxido Carbono
4	Etano
5	Propano
6	Água
7	Hidrogênio
8	Sulfeto de Hidrogênio
9	Monóxido de Carbono
10	Oxigênio
11	i-Butano
12	n-Butano
13	i-Pentano
14	n-Pentano
15	n-Hexano
16	n-Heptano
17	n-Octano
18	n-Nonano
19	n-Decano
20	Hélio

Fonte: Próprio autor (2017)

Para validar e verificar os resultados do algoritmo foram realizados alguns testes que se basearam em comparar o valor encontrado da velocidade do som no gás natural pelo algoritmo com os valores verificados pela *American Gas Association*.

A *American Gas Association* define valores tabelados da velocidade som no gás natural quando uma amostra do fluido com determinada composição é submetida a uma determinada pressão e temperatura. A Tabela 4 e Tabela 5 apresentam, respectivamente, a composição dos gases utilizados nos testes e a comparação entre os valores encontrados pelo algoritmo com os representados pela *American Gas Association* em sua norma AGA10.

Tabela 4 - Diferentes misturas de gás natural utilizada para o teste do algoritmo

Componente	Costa do Golfo	Amarillo	Ekofisk	High N₂	High CO₂
Metano	96.5222	90.6724	85.9063	81.4410	81.2110
Nitrogênio	0.2595	3.1284	1.0068	13.4650	5.7020
Dióxido de Carbono	0.5956	0.4676	1.4954	0.9850	7.5850
Etano	1.8186	4.5279	8.4919	3.3000	4.3030
Propano	0.4596	0.8280	2.3015	0.6050	0.8950
Isobutano	0.0977	0.1037	0.3486	0.1000	0.1510
N-butano	0.1007	0.1563	0.3506	0.1040	0.1520
Isopentano	0.0473	0.0321	0.0509	0.0000	0.0000
N-pentano	0.0324	0.0443	0.0480	0.0000	0.0000
N-Hexano	0.0664	0.0393	0.000	0.0000	0.0000

Fonte: Norma internacional AGA 10 (2003)

Tabela 5 - Comparação dos valores encontrados

Pressão (MPa)	Temperatura (°C)	Composição	Velocidade do som (AGA 10) (m/s)	Velocidade do som (Algoritmo) (m/s)
0.101560	0	Gulf Coast	419.5867	419.5867
0.101560	0	Amarilio	409.3274	409.3274
0.689476	10	Ekofisk	397.0729	397.0729
0.689476	10	Amarilio	413.5034	413.5034
4.136854	37.77778	High N_2	417.9039	417.9039
4.136854	37.77778	High CO_2	399.7063	399.7063
6.894757	54.44444	Gulf Coast	449.0665	449.0665
6.894757	54.44444	Amarilio	437.1847	437.1847
8.273709	54.44444	High N_2	433.7584	433.7584
8.273709	54.44444	Ekofisk	415.5661	415.5661

Fonte: Próprio Autor (2017)

Os resultados apresentados na Tabela 5 mostram que os valores cálculos pelo algoritmo não apresentam diferença em relação aos valores sugeridos pela *American Gas Association*. Como os dados dessa associação apresentam teor científico e são aceitos no mercado internacional, foi comprovado experimentalmente que o algoritmo apresenta cálculos confiáveis.

4.5. Software para Distribuição

Após a validação do algoritmo o mesmo foi modelado em C/C++ utilizando a mesma lógica das funções programadas em VBA. Assim, foi desenvolvido um software com interface gráfica para de distribuição livre.

O sistema foi desenvolvido para atuar da seguinte maneira:

1. Dados de processos (composição do gás natural, pressão e temperatura) são inputados pelo operador;
2. O sistema calcula o valor da velocidade do som no gás natural e da compressibilidade e então mostra os resultados ao usuário.

A Figura 8 apresenta o resultado da interface gráfica desenvolvida para o programa e os valores encontrados ao inputar parâmetros.

Fração Molar (%)			
Metano (CH ₄):	Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S):	Ipentano:	Ndecano:
96,5222	0	0,0473	0
Nitrogênio (N ₂):	Hidrogênio (H ₂):	Npentano:	Hélio (HE):
0,2595	0	0,0324	0
Dióxido de Carbono (CO ₂):	Monóxido de Carbono (CO):	Nhexano:	
0,5956	0	0,0664	
Etano (C ₂ H ₆):	Oxigênio (O ₂):	Nheptano:	
1,8186	0	0	
Propano (C ₃ H ₈):	Ibutano:	Noctano:	
0,4596	0,0977	0	
Água (H ₂ O):	Nbutano:	Nnonano:	
0	0,1007	0	

Dados de Processo:		Compressibilidade	
Pressão:	68,94757 Bar	Compressibilidade (Z):	0,918669482556583
Temperatura:	54,44444 °C	Velocidade do Som:	449,066534335515
		Densidade:	
		<input type="button" value="Calcular"/> <input type="button" value="Limpar"/>	

Figura 8 – Software desenvolvido para download

Fonte: Próprio Autor (2017)

4.6. Software Dedicado

O *software* desenvolvido para Companhia de Gás Natural do Maranhão foi modelado para ser uma ferramenta mais completa e de uso particular pela empresa.

O sistema foi desenvolvido em Excel 2010 utilizando linguagem de programação VBA e teve como função final a geração automática de relatórios, contendo diversos parâmetros de análise entre as velocidades do som geradas nos diagnósticos pelos medidores de vazão ultrassônicos, que são utilizados nas linhas de medição de gás natural da distriuidora, com os valores calculados pelo sistema.

Os principais resultados apresentados pelo sistema foram :

1. Cálculo da velocidade do som utilizando dados de processos (Pressão, temperatura e composição do GN) em tempo real com média de segundo a segundo durante todo o período de diagnóstico.
2. Geração de relatórios e gráficos comparados os valores da velocidade do som gerada nos diagnósticos, que utilizam dados de processo fixos, e os valores encontrados pelo sistema, que utilizam os dados de processo em tempo real.

Para o software obter os dados em tempo real dos instrumentos de processo, foram programadas algumas funções para leitura de um banco dados dedicado que tem como input os dados do programa de automação de coleta *Historian*, onde o mesmo foi programado para armazenar a cada segundo os dados gerados por todos os instrumentos que fazem parte do processo de medição da empresa.

A Figura 9, demonstra a tela de apresentação da versão final sistema.

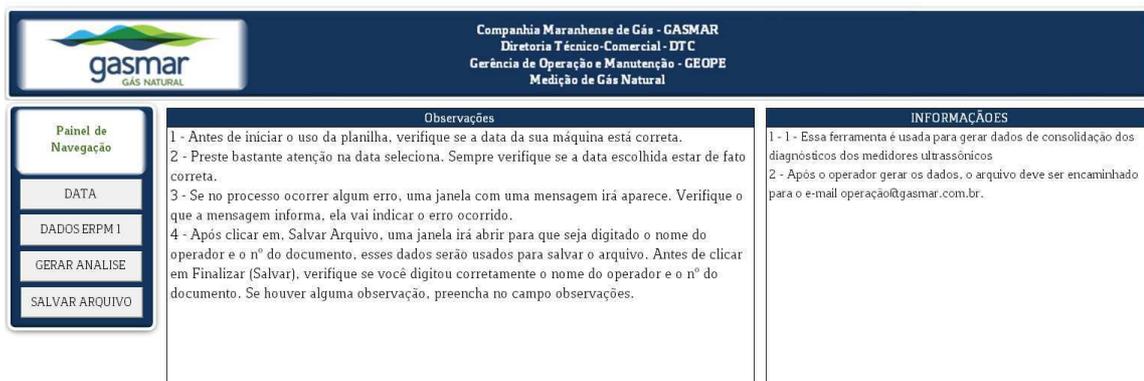


Figura 9 - Ferramenta desenvolvida para GASMAR

Fonte: Próprio Autor (2017)

Para verificação dos resultados gerados pelo software, foi utilizada uma análise realizada pela GASMAR que comparou os valores calculados pelo sistema com os valores gerados no diagnóstico, realizado no período das 9h40min50s às 10h41min50s do dia 20/12/2016, de um dos medidores de vazão ultrassônicos da Estação de Regulagem de Pressão e Medição operados pela GASMAR.

 Companhia Maranhense de Gás - GASMAR Diretoria Técnico-Comercial - DTC Gerência de Operação e Manutenção - GEOPE Medição de Gás Natural				
Data	Hora	Velocidade do Som - Diagnostico (m/s)	Velocidade do Som - Sistema (m/s)	Diferença (%)
20/12/2016	09:41:51	426,40	426,86	0,1081%
20/12/2016	09:41:52	426,37	426,86	0,1151%
20/12/2016	09:41:53	426,38	426,86	0,1128%
20/12/2016	09:41:54	426,40	426,86	0,1081%
20/12/2016	09:41:55	426,43	426,86	0,1010%
20/12/2016	09:41:56	426,44	426,86	0,0987%
20/12/2016	09:41:57	426,41	426,86	0,1057%
20/12/2016	09:41:58	426,43	426,86	0,1010%
20/12/2016	09:41:59	426,38	426,86	0,1128%
20/12/2016	09:42:00	426,37	426,86	0,1151%
20/12/2016	09:42:01	426,39	426,86	0,1104%
20/12/2016	09:42:02	426,40	426,86	0,1081%
20/12/2016	09:42:03	426,43	426,86	0,1010%
20/12/2016	09:42:04	426,43	426,86	0,1010%
20/12/2016	09:42:05	426,40	426,86	0,1081%
20/12/2016	09:42:06	426,39	426,86	0,1104%
20/12/2016	09:42:07	426,38	426,86	0,1128%
20/12/2016	09:42:08	426,41	426,86	0,1057%
20/12/2016	09:42:09	426,42	426,86	0,1034%
20/12/2016	09:42:10	426,41	426,86	0,1057%
20/12/2016	09:42:11	426,42	426,86	0,1034%
20/12/2016	09:42:12	426,41	426,86	0,1057%
20/12/2016	09:42:13	426,37	426,86	0,1151%
20/12/2016	09:42:14	426,37	426,86	0,1151%
20/12/2016	09:42:15	426,40	426,85	0,1054%
20/12/2016	09:42:16	426,40	426,85	0,1054%
20/12/2016	09:42:17	426,40	426,85	0,1054%
20/12/2016	09:42:18	426,40	426,85	0,1054%
20/12/2016	09:42:19	426,39	426,85	0,1077%

Figura 10 – Parte do relatório gerado pelo software no período analisado

Fonte: Próprio Autor (2017)

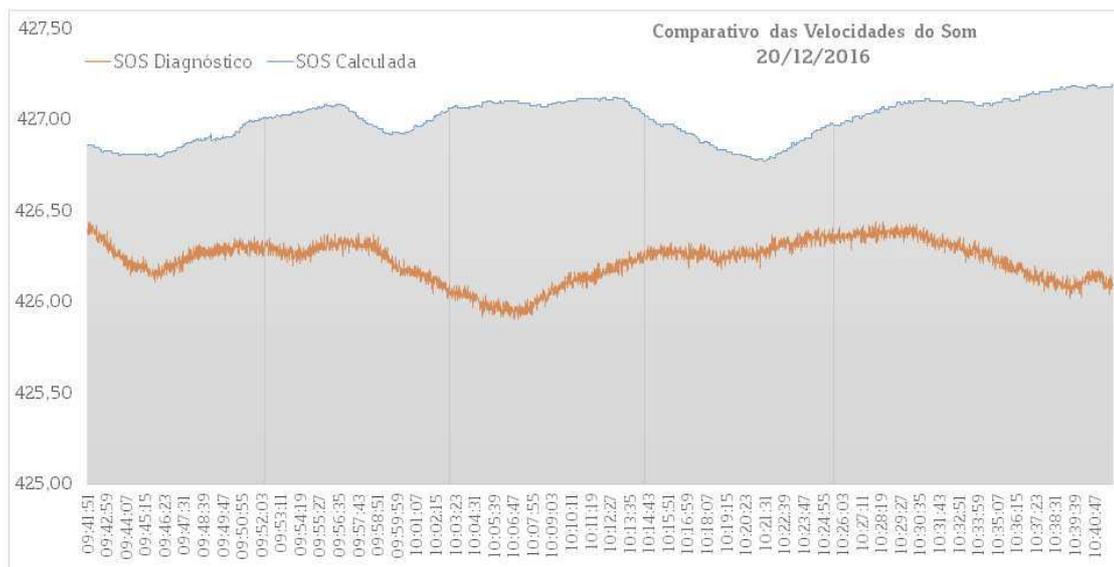


Figura 11 – Gráfico de linha gerado pelo software mostrando o comparativo entre os resultados

Fonte: Próprio Autor (2017)

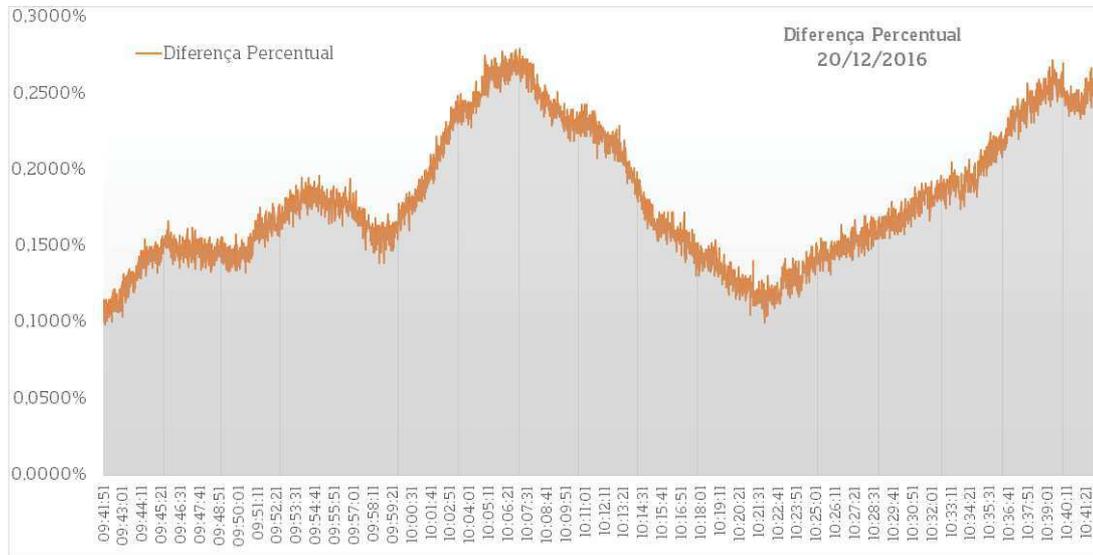


Figura 12 – Gráfico gerado pelo software mostrando a diferença percentual dos resultados

Fonte: Próprio Autor (2017)

 Companhia Maranhense de Gás - GASMAR Diretoria Técnico-Comercial - DTC Gerência de Operação e Manutenção - GEOPE Medição de Gás Natural				
Resultado Final				
Data	Velocidade Média do Som - Diagnostico (m/s)	Velocidade do Som Calculada - Sistema (m/s)	Diferença Encontrada	Diferença Máxima Permitida (AGA 10)
20/12/2016	426,23	427,01	0,1821%	0,2%

Figura 13 - Incerteza encontrado no processo de análise

Fonte: Próprio Autor (2017)

Podemos notar, a partir dos resultados gerados pelo software, que a diferença percentual média entre as velocidades do som no GN apresentam valores inferiores ao máximo permitido por norma (0,2%). O que sugere que os valores de volume apresentados pelo medidor de vazão ultrassônico estão dentro da faixa de incerteza permitidos, porém próximos da faixa máxima de limite permitida.

5. CONCLUSÃO

A avaliação das incertezas gerados nos instrumentos de medição de vazão é, sem dúvida, um fator de grande importância no mercado de distribuição de gás natural. O desenvolvimento de métodos que possam avaliar essas incertezas contribuem de maneira significativa para o avanço dos processos de medição de volume do GN.

De acordo com os resultados apresentados, pode-se concluir que os objetivos proposto para o trabalho foram alcançados. Onde:

- O algoritmo para cálculo da velocidade do som apresenta métodos matemáticos confiáveis e apesar de ser desenvolvido para auxiliar no desenvolvimento dos produtos relacionados a esse trabalho, pode ser utilizado ou melhorado para se adequar outras situações.
- O Software desenvolvido para distribuição facilita ao usuário que não tenha conhecimento de programação a manipular o algoritmo desenvolvido.
- Para trabalhos futuros pode ser avaliada a possibilidade de acrescentar ao software dedicado a GASMAR funções para comparar a velocidade do som em cada par de transdutores com a velocidade do som calculada. Possibilitando uma verificação mais refinada no processo.
- A proposta para o desenvolvimento de um software que seria utilizado diretamente nos processos de avaliação de incerteza dos medidores de vazão ultrassônicos da Companhia de Gás Natural (GASMAR) foi o pilar para o desenvolvimento desse trabalho, da minha formação acadêmica como engenheiro mecânico e certamente um grande desafio.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 16107 - FATOR DE CONVERSÃO DO VOLUME DE GÁS**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.

A.G.A. **Transmission Measurement Committee Report No. 8 Compressibility Factors of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases**, American Gas Association, Washington, D.C., November 2003.

ANP. **Portaria conjunto ANP/INMETRO Nº 1**. Agencia Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE GÁS CANALIZADO. Disponível em: < <http://www.abegas.org.br/Site/?p=40860>>. Acesso: 19/04/2017.

BARBOZA, DAVSON C. F. **Cálculo de Consumo Corrigido de Gás Natural para Medidores do Vazão do Tipo Ultrassônico por Meio de um Aplicativo em Visual Basic For Application (VBA)**, 2013.

CASTELANI, RICARDO MÁRCIO. **Sistema Especialista para o Gerenciamento Operacional de Redes de Distribuição de Gás Natural**, 2003.

CÂMARA, DANIEIL. G. V. **Projeto para Estação de Medição de Gás Natural**, 2010.

COMPANHIA DE GÁS NATURAL DO MARANHÃO – GASMAR. Disponível em: <<http://gasmar.com.br/index.php/2013-11-10-17-53-59/2014-06-20-00-05-45>>. Acesso: 15/04/2017.

DELMEE, GERARD J. **Manual de Medição de Vazão**. Blucher, 2003.

EMERSON, **Manual - Medidor de Vazão Ultrassônico**, 2013.

PUC – RIO Disponível em:

<http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0713644_09_cap_01.pdf;
http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0713644_09_cap_02.pdf
http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0713644_09_cap_03.pdf

http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0713644_09_cap_04.pdf
http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0713644_09_cap_05.pdf>.

Acesso: 19/04/2017.

SILVA, JOSÉ ALBERTO P. DA SILVA. **Importância da Avaliação das Incertezas na Medição dos Volumes de Petróleo e Gás Natural**, 2010.

KAWAKITA, K.; SANTO, G. E.; TELLES, R. S. **A Metrologia de Vazão de Gás Natural no Brasil**. 2007. Revista Metrologia e Instrumentação. São Paulo, SP.

PAULO C. N. ANDRADE; LUIZ E. A. FERREIRA; PAULO S. DE M. ROCHA. **A Metrologia de Vazão de Gás Natural no Brasil**. Revista Analytica, 2006.

TRANSMISSION MEASUREMENT COMMITTEE. **AGA 10 Speed Of Sound in Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases**, American Gas Association, 2003.

ANEXOS

ANEXO A - COEFICIENTES DE CAPACIDADE CALORIFICA, ENTALPIA E ENTROPIA

Componente	A (cal/mol)	B (cal/mol-K)	C (cal/mol-K ²)	D (K)	E (cal/mol-K)	F (K)	G (cal/mol-K)	H (K)	I (cal/mol-K)	J (K)	K (cal/mol-K)
Metano	-29776.4	7.95454	43.9417	1037.09	1.56373	813.205	-24.9027	1019.98	-10.1601	1070.14	-20.0615
Nitrogênio	-3495.34	6.95587	0.272892	662.738	-0.291318	-680.562	1.78980	1740.06	0	100	4.49823
Dióxido de Carbono	20.7307	6.96237	2.68645	500.371	-2.56429	-530.443	3.91921	500.198	2.13290	2197.22	5.81381
Etano	-37524.4	7.98139	24.3668	752.320	3.53990	272.846	8.44724	1020.13	-13.2732	869.510	-22.4010
Propano	-56072.1	8.14319	37.0629	735.402	9.38159	247.190	13.4556	1454.78	-11.7342	984.518	-24.0426
Água	-13773.1	7.97183	6.27078	2572.63	2.05010	1156.72	0	100	0	100	-3.24989
Sulfeto de Hidrogênio	-10085.4	7.94680	-0.0838	433.801	2.85539	843.792	6.31595	1481.43	-2.88457	1102.23	-0.51551
Hidrogênio	-5565.6	6.66789	2.33458	2584.98	0.749019	559.656	0	100	0	100	-7.94821
Monóxido de Carbono	-2753.49	6.95854	2.02441	1541.22	0.096774	3674.81	0	100	0	100	6.23387
Oxigênio	-3497.45	6.96302	2.40013	2522.05	2.21752	1154.15	0	100	0	100	9.19749
I-Butano	-72387	17.8143	58.2062	1787.39	40.7621	808.645	0	100	0	100	-44.1341
N-Butano	-72674.8	18.6383	57.4178	1792.73	38.6599	814.151	0	100	0	100	-46.1938
I-Pentano	-91505.5	21.3861	74.3410	1701.58	47.0587	775.899	0	100	0	100	-60.2474
N-Pentano	-83845.2	22.5012	69.5789	1719.58	46.2164	802.174	0	100	0	100	-62.2197
Hexano	-94982.5	26.6225	80.3819	1718.49	55.6598	802.069	0	100	0	100	-77.5366
Heptano	-103353	30.4029	90.6941	1669.32	63.2028	786.001	0	100	0	100	-92.0164
Octano	-109674	34.0847	100.253	1611.55	69.7675	768.847	0	100	0	100	-106.149
Nonano	-122599	38.5014	111.446	1646.48	80.5015	781.588	0	100	0	100	-122.444
Decano	-133564	42.7143	122.173	1654.85	90.2255	785.564	0	100	0	100	-138.006
Hélio	0.0	4.968	0	100	0	100	0	100	0	100	1.8198
Argônio	0.0	4.968	0	100	0	100	0	100	0	100	8.6776

Fonte: Norma internacional AGA 10 (2003)

ANEXO B - CONSTANTES PARA CÁLCULO DE Z PELO MÉTODO DETALHADO

n	a_n	b_n	c_n	k_n	u_n	g_n	q_n	f_n	s_n	w_n
1	0.153832600	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1.341953000	1	0	0	0.5	0	0	0	0	0
3	-2.998583000	1	0	0	1	0	0	0	0	0
4	-0.048312280	1	0	0	3.5	0	0	0	0	0
5	0.375796500	1	0	0	-0.5	1	0	0	0	0
6	-1.589575	1	0	0	4.5	1	0	0	0	0
7	-0.05358847	1	0	0	0.5	0	1	0	0	0
8	0.88659463	1	0	0	7.5	0	0	0	1	0
9	-0.71023704	1	0	0	9.5	0	0	0	1	0
10	-1.471722	1	0	0	6	0	0	0	0	1
11	1.32185035	1	0	0	12	0	0	0	0	1
12	-0.78665925	1	0	0	12.5	0	0	0	0	1
13	2.291290E-9	1	1	3	-6	0	0	1	0	0
14	0.1576724	1	1	2	2	0	0	0	0	0
15	-0.4363864	1	1	2	3	0	0	0	0	0
16	-0.04408159	1	1	2	2	0	1	0	0	0
17	-0.003433888	1	1	4	2	0	0	0	0	0
18	0.03205905	1	1	4	11	0	0	0	0	0
19	0.02487355	2	0	0	-0.5	0	0	0	0	0
20	0.07332279	2	0	0	0.5	0	0	0	0	0
21	-0.001600573	2	1	2	0	0	0	0	0	0
22	0.6424706	2	1	2	4	0	0	0	0	0
23	-0.4162601	2	1	2	6	0	0	0	0	0
24	-0.06689957	2	1	4	21	0	0	0	0	0
25	0.2791795	2	1	4	23	1	0	0	0	0
26	-0.6966051	2	1	4	22	0	1	0	0	0
27	-0.002860589	2	1	4	-1	0	0	1	0	0
28	-0.008098836	3	0	0	-0.5	0	1	0	0	0
29	3.150547	3	1	1	7	1	0	0	0	0
30	0.007224479	3	1	1	-1	0	0	1	0	0
31	-0.7057529	3	1	2	6	0	0	0	0	0
32	0.5349792	3	1	2	4	1	0	0	0	0
33	-0.07931491	3	1	3	1	1	0	0	0	0
34	-1.418465	3	1	3	9	1	0	0	0	0
35	-5.99905E17	3	1	4	-13	0	0	1	0	0

n	a_n	b_n	c_n	k_n	u_n	g_n	q_n	f_n	s_n	w_n
36	0.1058402	3	1	4	21	0	0	0	0	0
37	0.03431729	3	1	4	8	0	1	0	0	0
38	-0.007022847	4	0	0	-0.5	0	0	0	0	0
39	0.02495587	4	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0.04296818	4	1	2	2	0	0	0	0	0
41	0.7465453	4	1	2	7	0	0	0	0	0
42	-0.2919613	4	1	2	9	0	1	0	0	0
43	7.294616	4	1	4	22	0	0	0	0	0
44	-9.936757	4	1	4	23	0	0	0	0	0
45	-0.005399808	5	0	0	1	0	0	0	0	0
46	-0.2432567	5	1	2	9	0	0	0	0	0
47	0.04987016	5	1	2	3	0	1	0	0	0
48	0.003733797	5	1	4	8	0	0	0	0	0
49	1.874951	5	1	4	23	0	1	0	0	0
50	0.002168144	6	0	0	1.5	0	0	0	0	0
51	-0.6587164	6	1	2	5	1	0	0	0	0
52	0.000205518	7	0	0	-0.5	0	1	0	0	0
53	0.009776195	7	1	2	4	0	0	0	0	0
54	-0.02048708	8	1	1	7	1	0	0	0	0
55	0.01557322	8	1	2	3	0	0	0	0	0
56	0.006862415	8	1	2	0	1	0	0	0	0
57	-0.001226752	9	1	2	1	0	0	0	0	0
58	0.002850908	9	1	2	0	0	1	0	0	0

Fonte: Norma internacional AGA 8 (2003)

ANEXO C - PARÂMETROS DE INTERAÇÃO BINÁRIA

CID(i)	CID(j)	Componente	E_{ij}^*	U_{ij}	K_{ij}	G_{ij}
1	2	Metano/ Nitrogênio	0,971640	0,886106	1,003630	
	3	Dióxido de Carbono	0,960644	0,963827	0,995933	0,807653
	4	Etano				
	5	Propano	0,994635	0,990877	1,007619	
	6	Água	0,708218			
	7	Sulfeto de Hidrogênio	0,931484	0,736833	1,000080	
	8	Hidrogênio	1,170520	1,156390	1,023260	1,957310
	9	Monóxido de Carbono	0,990126			
	10	Oxigênio				
	11	I-butano	1,019530			
	12	n-Butano	0,989844	0,992291	0,997596	
	13	I-Pentano	1,002350			
	14	N-Pentano	0,999268	1,003670	1,002529	
	15	N-Hexano	1,107274	1,302576	0,982962	
	16	N-Heptano	0,880880	1,91904	0,983565	
	17	N-Octano	0,880973	1,205769	0,982707	
	18	N-Nonano	0,881067	1,219634	0,981849	
	19	N-Decano	0,881161	1,233498	0,980991	
2	3	Nitrogênio/ Dióxido de Carbono	1,022740	0,835058	0,982361	0,982746
	4	Etano	0,970120	0,816431	1,007960	
	5	Propano	0,945939	0,915502		
	6	Água	0,746954			
	7	Sulfeto de Hidrogênio	0,902271	0,993476	0,942596	
	8	Hidrogênio	1,086320	0,408838	1,032270	
	9	Monóxido de Carbono	1,005710			
	10	Oxigênio	1,021000			
	11	I-butano	0,946914			
	12	n-Butano	0,973384	0,993556		
	13	I-Pentano	0,959340			
	14	N-Pentano	0,945520			
3	4	Dióxido de Carbono/Etano	0,925053	0,969870	1,008510	0,370296
	5	Propano	0,960237			
	6	Água	0,849408			1,673090
	7	Sulfeto de Hidrogênio	0,955052	1,045290	1,007790	
	8	Hidrogênio	1,281790			
	9	Monóxido de Carbono	1,500000	0,900000		
	10	Oxigênio				
	11	I-butano	0,906849			
	12	n-Butano	0,897362			
	13	I-Pentano	0,726255			
	14	N-Pentano	0,859764			
	15	N-Hexano	0,855134	1,066638	0,910183	
	16	N-Heptano	0,831229	1,077634	0,895362	

CID(i)	CID(j)	Componente	E_{ij}^*	U_{ij}	K_{ij}	G_{ij}
	17	N-Octano	0,808310	1,088178	0,881152	
	18	N-Nonano	0,786323	1,098291	0,867520	
	19	N-Decano	0,765171	1,108021	0,854406	
4	5	Propano	1,022560	1,065173	0,986893	
	6	Água	0,693168			
	7	Sulfeto de Hidrogênio	0,946871	0,971956	0,999969	
	8	Hidrogênio	1,164460	1,616660	1,020340	
	9	Monóxido de Carbono				
	10	Oxigênio				
	11	I-butano		1,2500000		
	12	n-Butano	1,013060	1,2500000		
	13	I-Pentano		1,2500000		
	14	N-Pentano	1,005320	1,2500000		
5	8	Propano/Hidrogênio	1,034787			
	12	N-butano	1,004900			
CID(i)	CID(j)	Componente	E_{ij}^*	U_{ij}	K_{ij}	G_{ij}
7	15	Sulfeto de Hidrogênio/ N-Hexano	1,008692	1,028973	0,968130	
	16	N-Heptano	1,010126	1,033754	0,962870	
	17	N-Octano	1,011501	1,038338	0,957828	
	18	N-Nonano	1,012821	1,042735	0,952441	
	19	N-Decano	1,014089	1,046966	0,948338	
8	9	Hidrogênio/ Monóxido de Carbono	1,100000			
	10	Oxigênio				
	11	I-Butano	1,300000			
	12	N-Butano	1,300000			

Fonte: Norma internacional AGA 8 (2003)

ANEXO D - PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO USADOS NO MÉTODO DE CÁLCULO DETALHADO DE Z

CID	Componente	Massa Molar Mr	Parâmetro de Energia E (K)	Parâmetro de Tamanho K (m ³ /kg-mole) ^{1/3}	Parâmetro de Orientação G	Parâmetro Quadruplo Q
1	Metano	16,0430	151,3183	0,4619255	0	0
2	Nitrogênio	28,0135	99,737780	0,4479153	0,027815	0
3	Dióxido de Carbono	44,0100	241,96060	0,4557498	0,189065	0,69000
4	Etano	30,07	244,1667	0,5279209	0,079300	0
5	Propano	44,0970	298,1183	0,5837490	0,141239	0
6	Água	18,0153	514,015600	0,3825868	0,332500	1,067750
7	Sulfeto de Hidrogênio	34,0820	296,355	0,4618263	0,088500	0,633276
8	Hidrogênio	2,0159	26,957940	0,3514916	0,034369	0
9	Monóxido de Carbono	28,0100	105,534800	0,4533894	0,038953	0
10	Oxigênio	31,9988	122,766700	0,4186954	0,021000	0
11	I-Butano	58,1230	324,068900	0,6406937	0,256692	0
12	N-Butano	58,1230	337,638900	0,6341423	0,281835	0
13	I-Pentano	72,1500	365,599900	0,6738577	0,332267	0
14	N-Pentano	72,1500	370,682300	0,6792307	0,366911	0
15	N-Hexano	86,1770	402,636293	0,7175118	0,289731	0
16	N-heptano	100,2040	427,722630	0,7525189	0,33752	0
17	N-Octano	114,2310	450,325022	0,7849550	0,383381	0
18	N-nonano	128,2580	470,840891	0,8152731	0,427354	0
19	N-Decano	142,2850	489,558373	0,8437826	0,469659	0
20	Hélio	4,0026	2,610111	0,3589888	0	0
21	Argônio	39,9480	119,62990	0,426551	0	0

Fonte: Norma internacional AGA 8 (2003)

ANEXO E - OUTROS PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO USADOS NO MÉTODO DE CÁLCULO DETALHO DE Z

CID	Componente	Parâmetro de Alta Temperatura F	Parâmetro Dipole S	Parâmetro de Associação W
1	Metano	0	0	0
2	Nitrogênio	0	0	0
3	Dióxido de Carbono	0	0	0
4	Etano	0	0	0
5	Propano	0	0	0
6	Água	0	1,5822	1
7	Sulfeto de Hidrogênio	0	0,39	0
8	Hidrogênio	1	0	0
9	Monóxido de Carbono	0	0	0
10	Oxigênio	0	0	0
11	I-Butano	0	0	0
12	N-Butano	0	0	0
13	I-Pentano	0	0	0
14	N-Pentano	0	0	0
15	N-Hexano	0	0	0
16	N-heptano	0	0	0
17	N-Octano	0	0	0
18	N-nonano	0	0	0
19	N-Decano	0	0	0
20	Hélio	0	0	0
21	Argônio	0	0	0

Fonte: Norma internacional AGA 8 (2003)

APÊNDICE

ALGORITMO PARA CÁLCULO DA VELOCIDADE DO SOM NO GN.

'Desenvolvido por Cleidson Luis Silva Souza
'(98)98824-3601 - Cleidsonluis.29@gmail.com

Dim x(1 To 21) As Double
Dim xbf(1 To 21) As Double

'Variáveis para cálculo das derivadas na Function SOS(P As Double, T As Double, comp As Range) As Double - Função para cálculo da velocidade do som

Dim ddBdT As Double 'Derivada parcial do coeficiente viral (B) em relação a Temperatura (T)
Dim dd2BbT2 As Double 'Derivada parcial dupla do coeficiente viral (B) em relação a Temperatura (T)
Dim ddZdt As Double 'Derivada parcial da compressibilidade (Z) em relação a Temperatura (T)
Dim dd2ZdT2 As Double 'Derivada parcial dupla da compressibilidade (Z) em relação a Temperatura (T)
Dim ddZdp As Double 'Derivada parcial da compressibilidade (Z) em relação a densidade (p)

'Variáveis para cálculo das derivadas na Function compressibilidade(Den As Double) As Double - Função para cálculo da compressibilidade com a Densidade como variável de entrada

'Gaussian quadrature

Dim DdBdT As Double 'Derivada parcial do coeficiente viral (B) em relação a Temperatura (T)
Dim DddZdT As Double 'Derivada parcial da compressibilidade (Z) em relação a Temperatura (T)
Dim Ddd2BdT2 As Double 'Derivada parcial dupla do coeficiente viral (B) em relação a Temperatura (T)
Dim Ddd2ZdT2 As Double 'Derivada parcial dupla da compressibilidade (Z) em relação a Temperatura (T)
Dim DddZdp As Double 'Derivada parcial da compressibilidade (Z) em relação a densidade (p)

Dim tempet, Massa, Densidade, R, pressao, Den, Densidade2, Zse, Zto, Ws As Double
Dim cp0 As Double

Function SOS(P As Double, T As Double, comp As Range) As Double

P = P * 100000
pressao = P
T = T + 273.15
tempet = T

Dim cpx As Double
Dim DT, FT, HT, JT, DX, FXc, HX, JX As Double
Dim sinhDT, coshFT, sinhHT, coshJT As Double
Dim CT(1 To 21, 1 To 11) As Double
Dim Ei(1 To 21) As Double
Dim Ki(1 To 21) As Double
Dim Gi(1 To 21) As Double
Dim Qi(1 To 21) As Double
Dim Fi(1 To 21) As Double
Dim Si(1 To 21) As Double
Dim Wi(1 To 21) As Double
Dim ax(1 To 59) As Double
Dim bx(1 To 59) As Double
Dim cx(1 To 59) As Double
Dim kx(1 To 59) As Double
Dim ux(1 To 59) As Double
Dim GX(1 To 59) As Double
Dim qx(1 To 59) As Double
Dim FX(1 To 59) As Double
Dim sx(1 To 59) As Double
Dim wx(1 To 59) As Double
Dim Eijo(1 To 21, 1 To 21) As Double
Dim Uij(1 To 21, 1 To 21) As Double
Dim Kij(1 To 21, 1 To 21) As Double
Dim Gijo(1 To 21, 1 To 21) As Double
Dim sum1 As Double
Dim sum2 As Double
Dim K As Double
Dim B As Double
Dim U As Double
Dim G As Double
Dim Q As Double
Dim F As Double
Dim d As Double
Dim Z As Double
'Dim R As Double
Dim it(1 To 4) As Double
Dim d2 As Double
Dim D3 As Double
Dim Z2 As Double

```
Dim mx(1 To 21) As Double
Dim M As Double
Dim Gr As Double
Dim par As Double
Dim bi(1 To 3, 1 To 3, 1 To 3) As Double
Dim ci(1 To 3, 1 To 3, 1 To 3, 1 To 3) As Double
Dim Bi2(1 To 3, 1 To 3) As Double
Dim ci2(1 To 3, 1 To 3) As Double
Dim P2 As Double
Dim T2 As Double
Dim Gr2 As Double
Dim vol As Double
Dim Z3 As Double
Dim testp As Boolean
Dim testt As Boolean
Dim ia As Integer
Dim ib As Integer
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim n As Integer
Dim teste As Integer
```

```
testp = False
testt = False
teste = 0
n = 0
R = 8.31451
```

```
x(1) = comp(1, 1)
x(2) = comp(2, 1)
x(3) = comp(3, 1)
x(4) = comp(4, 1)
x(5) = comp(5, 1)
x(6) = comp(6, 1)
x(7) = comp(7, 1)
x(8) = comp(8, 1)
x(9) = comp(9, 1)
x(10) = comp(10, 1)
x(11) = comp(11, 1)
x(12) = comp(12, 1)
x(13) = comp(13, 1)
x(14) = comp(14, 1)
x(15) = comp(15, 1)
x(16) = comp(16, 1)
x(17) = comp(17, 1)
x(18) = comp(18, 1)
x(19) = comp(19, 1)
x(20) = comp(20, 1)
```

```
xbf(1) = comp(1, 1)
xbf(2) = comp(2, 1)
xbf(3) = comp(3, 1)
xbf(4) = comp(4, 1)
xbf(5) = comp(5, 1)
xbf(6) = comp(6, 1)
xbf(7) = comp(7, 1)
xbf(8) = comp(8, 1)
xbf(9) = comp(9, 1)
xbf(10) = comp(10, 1)
xbf(11) = comp(11, 1)
xbf(12) = comp(12, 1)
xbf(13) = comp(13, 1)
xbf(14) = comp(14, 1)
xbf(15) = comp(15, 1)
xbf(16) = comp(16, 1)
xbf(17) = comp(17, 1)
xbf(18) = comp(18, 1)
xbf(19) = comp(19, 1)
xbf(20) = comp(20, 1)
```

```
For i = 1 To 20
    x(i) = x(i) * 0.01
Next
```

```
While n < 2
```

mx(1) = 16.043
mx(2) = 28.0135
mx(3) = 44.01
mx(4) = 30.07
mx(5) = 44.097
mx(6) = 18.0153
mx(7) = 34.082
mx(8) = 2.0459
mx(9) = 28.01
mx(10) = 31.9988
mx(11) = 58.123
mx(12) = 58.123
mx(13) = 72.15
mx(14) = 72.15
mx(15) = 86.177
mx(16) = 100.204
mx(17) = 114.231
mx(18) = 128.258
mx(19) = 142.285
mx(20) = 4.0026

ax(1) = 0.1538326
ax(2) = 1.341953
ax(3) = -2.998583
ax(4) = -0.04831228
ax(5) = 0.3757965
ax(6) = -1.589575
ax(7) = -0.05358847
ax(8) = 0.88659463
ax(9) = -0.71023704
ax(10) = -1.471722
ax(11) = 1.32185035
ax(12) = -0.78665925
ax(13) = 2.29129 * 0.000000001
ax(14) = 0.1576724
ax(15) = -0.4363864
ax(16) = -0.04408159
ax(17) = -0.003433888
ax(18) = 0.03205905
ax(19) = 0.02487355
ax(20) = 0.07332279
ax(21) = -0.001600573
ax(22) = 0.6424706
ax(23) = -0.4162601
ax(24) = -0.06689957
ax(25) = 0.2791795
ax(26) = -0.6966051
ax(27) = -0.002860589
ax(28) = -0.008098836
ax(29) = 3.150547
ax(30) = 0.007224479
ax(31) = -0.7057529
ax(32) = 0.5349792
ax(33) = -0.07931491
ax(34) = -1.418465
ax(35) = -5.99905 * 1E-17
ax(36) = 0.1058402
ax(37) = 0.03431729
ax(38) = -0.007022847
ax(39) = 0.02495587
ax(40) = 0.04296818
ax(41) = 0.7465453
ax(42) = -0.2919613
ax(43) = 7.294616
ax(44) = -9.936757
ax(45) = -0.005399808
ax(46) = -0.2432567
ax(47) = 0.04987016
ax(48) = 0.003733797
ax(49) = 1.874951
ax(50) = 0.002168144
ax(51) = -0.6587164
ax(52) = 0.000205518
ax(53) = 0.009776195
ax(54) = -0.02048708
ax(55) = 0.01557322
ax(56) = 0.006862415

ax(57) = -0.001226752

ax(58) = 0.002850908

bx(1) = 1
bx(2) = 1
bx(3) = 1
bx(4) = 1
bx(5) = 1
bx(6) = 1
bx(7) = 1
bx(8) = 1
bx(9) = 1
bx(10) = 1
bx(11) = 1
bx(12) = 1
bx(13) = 1
bx(14) = 1
bx(15) = 1
bx(16) = 1
bx(17) = 1
bx(18) = 1
bx(19) = 2
bx(20) = 2
bx(21) = 2
bx(22) = 2
bx(23) = 2
bx(24) = 2
bx(25) = 2
bx(26) = 2
bx(27) = 2
bx(28) = 3
bx(29) = 3
bx(30) = 3
bx(31) = 3
bx(32) = 3
bx(33) = 3
bx(34) = 3
bx(35) = 3
bx(36) = 3
bx(37) = 3
bx(38) = 4
bx(39) = 4
bx(40) = 4
bx(41) = 4
bx(42) = 4
bx(43) = 4
bx(44) = 4
bx(45) = 5
bx(46) = 5
bx(47) = 5
bx(48) = 5
bx(49) = 5
bx(50) = 6
bx(51) = 6
bx(52) = 7
bx(53) = 7
bx(54) = 8
bx(55) = 8
bx(56) = 8
bx(57) = 9
bx(58) = 9

cx(1) = 0
cx(2) = 0
cx(3) = 0
cx(4) = 0
cx(5) = 0
cx(6) = 0
cx(7) = 0
cx(8) = 0
cx(9) = 0
cx(10) = 0
cx(11) = 0
cx(12) = 0
cx(13) = 1
cx(14) = 1
cx(15) = 1

```
cx(16) = 1
cx(17) = 1
cx(18) = 1
cx(19) = 0
cx(20) = 0
cx(21) = 1
cx(22) = 1
cx(23) = 1
cx(24) = 1
cx(25) = 1
cx(26) = 1
cx(27) = 1
cx(28) = 0
cx(29) = 1
cx(30) = 1
cx(31) = 1
cx(32) = 1
cx(33) = 1
cx(34) = 1
cx(35) = 1
cx(36) = 1
cx(37) = 1
cx(38) = 0
cx(39) = 0
cx(40) = 1
cx(41) = 1
cx(42) = 1
cx(43) = 1
cx(44) = 1
cx(45) = 0
cx(46) = 1
cx(47) = 1
cx(48) = 1
cx(49) = 1
cx(50) = 0
cx(51) = 1
cx(52) = 0
cx(53) = 1
cx(54) = 1
cx(55) = 1
cx(56) = 1
cx(57) = 1
cx(58) = 1
```

```
kx(1) = 0
kx(2) = 0
kx(3) = 0
kx(4) = 0
kx(5) = 0
kx(6) = 0
kx(7) = 0
kx(8) = 0
kx(9) = 0
kx(10) = 0
kx(11) = 0
kx(12) = 0
kx(13) = 3
kx(14) = 2
kx(15) = 2
kx(16) = 2
kx(17) = 4
kx(18) = 4
kx(19) = 0
kx(20) = 0
kx(21) = 2
kx(22) = 2
kx(23) = 2
kx(24) = 4
kx(25) = 4
kx(26) = 4
kx(27) = 4
kx(28) = 0
kx(29) = 1
kx(30) = 1
kx(31) = 2
kx(32) = 2
kx(33) = 3
```

kx(34) = 3
kx(35) = 4
kx(36) = 4
kx(37) = 4
kx(38) = 0
kx(39) = 0
kx(40) = 2
kx(41) = 2
kx(42) = 2
kx(43) = 4
kx(44) = 4
kx(45) = 0
kx(46) = 2
kx(47) = 2
kx(48) = 4
kx(49) = 4
kx(50) = 0
kx(51) = 2
kx(52) = 0
kx(53) = 2
kx(54) = 1
kx(55) = 2
kx(56) = 2
kx(57) = 2
kx(58) = 2

ux(1) = 0
ux(2) = 0.5
ux(3) = 1
ux(4) = 3.5
ux(5) = -0.5
ux(6) = 4.5
ux(7) = 0.5
ux(8) = 7.5
ux(9) = 9.5
ux(10) = 6
ux(11) = 12
ux(12) = 12.5
ux(13) = -6
ux(14) = 2
ux(15) = 3
ux(16) = 2
ux(17) = 2
ux(18) = 11
ux(19) = -0.5
ux(20) = 0.5
ux(21) = 0
ux(22) = 4
ux(23) = 6
ux(24) = 21
ux(25) = 23
ux(26) = 22
ux(27) = -1
ux(28) = -0.5
ux(29) = 7
ux(30) = -1
ux(31) = 6
ux(32) = 4
ux(33) = 1
ux(34) = 9
ux(35) = -13
ux(36) = 21
ux(37) = 8
ux(38) = -0.5
ux(39) = 0
ux(40) = 2
ux(41) = 7
ux(42) = 9
ux(43) = 22
ux(44) = 23
ux(45) = 1
ux(46) = 9
ux(47) = 3
ux(48) = 8
ux(49) = 23
ux(50) = 1.5
ux(51) = 5

ux(52) = -0.5
ux(53) = 4
ux(54) = 7
ux(55) = 3
ux(56) = 0
ux(57) = 1
ux(58) = 0

GX(1) = 0
GX(2) = 0
GX(3) = 0
GX(4) = 0
GX(5) = 1
GX(6) = 1
GX(7) = 0
GX(8) = 0
GX(9) = 0
GX(10) = 0
GX(11) = 0
GX(12) = 0
GX(13) = 0
GX(14) = 0
GX(15) = 0
GX(16) = 0
GX(17) = 0
GX(18) = 0
GX(19) = 0
GX(20) = 0
GX(21) = 0
GX(22) = 0
GX(23) = 0
GX(24) = 0
GX(25) = 1
GX(26) = 0
GX(27) = 0
GX(28) = 0
GX(29) = 1
GX(30) = 0
GX(31) = 0
GX(32) = 1
GX(33) = 1
GX(34) = 1
GX(35) = 0
GX(36) = 0
GX(37) = 0
GX(38) = 0
GX(39) = 0
GX(40) = 0
GX(41) = 0
GX(42) = 0
GX(43) = 0
GX(44) = 0
GX(45) = 0
GX(46) = 0
GX(47) = 0
GX(48) = 0
GX(49) = 0
GX(50) = 0
GX(51) = 1
GX(52) = 0
GX(53) = 0
GX(54) = 1
GX(55) = 0
GX(56) = 1
GX(57) = 0
GX(58) = 0

qx(1) = 0
qx(2) = 0
qx(3) = 0
qx(4) = 0
qx(5) = 0
qx(6) = 0
qx(7) = 1
qx(8) = 0
qx(9) = 0
qx(10) = 0

qx(11) = 0
qx(12) = 0
qx(13) = 0
qx(14) = 0
qx(15) = 0
qx(16) = 1
qx(17) = 0
qx(18) = 0
qx(19) = 0
qx(20) = 0
qx(21) = 0
qx(22) = 0
qx(23) = 0
qx(24) = 0
qx(25) = 0
qx(26) = 1
qx(27) = 0
qx(28) = 1
qx(29) = 0
qx(30) = 0
qx(31) = 0
qx(32) = 0
qx(33) = 0
qx(34) = 0
qx(35) = 0
qx(36) = 0
qx(37) = 1
qx(38) = 0
qx(39) = 0
qx(40) = 0
qx(41) = 0
qx(42) = 1
qx(43) = 0
qx(44) = 0
qx(45) = 0
qx(46) = 0
qx(47) = 1
qx(48) = 0
qx(49) = 1
qx(50) = 0
qx(51) = 0
qx(52) = 1
qx(53) = 0
qx(54) = 0
qx(55) = 0
qx(56) = 0
qx(57) = 0
qx(58) = 1

FX(1) = 0
FX(2) = 0
FX(3) = 0
FX(4) = 0
FX(5) = 0
FX(6) = 0
FX(7) = 0
FX(8) = 0
FX(9) = 0
FX(10) = 0
FX(11) = 0
FX(12) = 0
FX(13) = 1
FX(14) = 0
FX(15) = 0
FX(16) = 0
FX(17) = 0
FX(18) = 0
FX(19) = 0
FX(20) = 0
FX(21) = 0
FX(22) = 0
FX(23) = 0
FX(24) = 0
FX(25) = 0
FX(26) = 0
FX(27) = 1
FX(28) = 0

```
FX(29) = 0
FX(30) = 1
FX(31) = 0
FX(32) = 0
FX(33) = 0
FX(34) = 0
FX(35) = 1
FX(36) = 0
FX(37) = 0
FX(38) = 0
FX(39) = 0
FX(40) = 0
FX(41) = 0
FX(42) = 0
FX(43) = 0
FX(44) = 0
FX(45) = 0
FX(46) = 0
FX(47) = 0
FX(48) = 0
FX(49) = 0
FX(50) = 0
FX(51) = 0
FX(52) = 0
FX(53) = 0
FX(54) = 0
FX(55) = 0
FX(56) = 0
FX(57) = 0
FX(58) = 0
```

```
sx(1) = 0
sx(2) = 0
sx(3) = 0
sx(4) = 0
sx(5) = 0
sx(6) = 0
sx(7) = 0
sx(8) = 1
sx(9) = 1
sx(10) = 0
sx(11) = 0
sx(12) = 0
sx(13) = 0
sx(14) = 0
sx(15) = 0
sx(16) = 0
sx(17) = 0
sx(18) = 0
sx(19) = 0
sx(20) = 0
sx(21) = 0
sx(22) = 0
sx(23) = 0
sx(24) = 0
sx(25) = 0
sx(26) = 0
sx(27) = 0
sx(28) = 0
sx(29) = 0
sx(30) = 0
sx(31) = 0
sx(32) = 0
sx(33) = 0
sx(34) = 0
sx(35) = 0
sx(36) = 0
sx(37) = 0
sx(38) = 0
sx(39) = 0
sx(40) = 0
sx(41) = 0
sx(42) = 0
sx(43) = 0
sx(44) = 0
sx(45) = 0
sx(46) = 0
```

```
sx(47) = 0
sx(48) = 0
sx(49) = 0
sx(50) = 0
sx(51) = 0
sx(52) = 0
sx(53) = 0
sx(54) = 0
sx(55) = 0
sx(56) = 0
sx(57) = 0
sx(58) = 0
```

```
wx(1) = 0
wx(2) = 0
wx(3) = 0
wx(4) = 0
wx(5) = 0
wx(6) = 0
wx(7) = 0
wx(8) = 0
wx(9) = 0
wx(10) = 1
wx(11) = 1
wx(12) = 1
wx(13) = 0
wx(14) = 0
wx(15) = 0
wx(16) = 0
wx(17) = 0
wx(18) = 0
wx(19) = 0
wx(20) = 0
wx(21) = 0
wx(22) = 0
wx(23) = 0
wx(24) = 0
wx(25) = 0
wx(26) = 0
wx(27) = 0
wx(28) = 0
wx(29) = 0
wx(30) = 0
wx(31) = 0
wx(32) = 0
wx(33) = 0
wx(34) = 0
wx(35) = 0
wx(36) = 0
wx(37) = 0
wx(38) = 0
wx(39) = 0
wx(40) = 0
wx(41) = 0
wx(42) = 0
wx(43) = 0
wx(44) = 0
wx(45) = 0
wx(46) = 0
wx(47) = 0
wx(48) = 0
wx(49) = 0
wx(50) = 0
wx(51) = 0
wx(52) = 0
wx(53) = 0
wx(54) = 0
wx(55) = 0
wx(56) = 0
wx(57) = 0
wx(58) = 0
```

```
Ei(1) = 151.3183
Ei(2) = 99.73778
Ei(3) = 241.9606
Ei(4) = 244.1667
Ei(5) = 298.1183
```

Ei (6) = 514.0156
Ei (7) = 296.355
Ei (8) = 26.95794
Ei (9) = 105.5348
Ei (10) = 122.7667
Ei (11) = 324.0689
Ei (12) = 337.6389
Ei (13) = 365.5999
Ei (14) = 370.6823
Ei (15) = 402.636293
Ei (16) = 427.72263
Ei (17) = 450.325022
Ei (18) = 470.840891
Ei (19) = 489.558373
Ei (20) = 2.610111

Ki (1) = 0.4619255
Ki (2) = 0.4479153
Ki (3) = 0.4557489
Ki (4) = 0.5279209
Ki (5) = 0.583749
Ki (6) = 0.3825868
Ki (7) = 0.4618263
Ki (8) = 0.3514916
Ki (9) = 0.4533894
Ki (10) = 0.4186954
Ki (11) = 0.6406937
Ki (12) = 0.6341423
Ki (13) = 0.6738577
Ki (14) = 0.6798307
Ki (15) = 0.7175118
Ki (16) = 0.7525189
Ki (17) = 0.784955
Ki (18) = 0.8152731
Ki (19) = 0.8437826
Ki (20) = 0.3589888

Gi (1) = 0
Gi (2) = 0.027815
Gi (3) = 0.189065
Gi (4) = 0.0793
Gi (5) = 0.141239
Gi (6) = 0.3325
Gi (7) = 0.0885
Gi (8) = 0.034369
Gi (9) = 0.038953
Gi (10) = 0.021
Gi (11) = 0.256692
Gi (12) = 0.281835
Gi (13) = 0.332267
Gi (14) = 0.366911
Gi (15) = 0.289731
Gi (16) = 0.337542
Gi (17) = 0.383381
Gi (18) = 0.427354
Gi (19) = 0.469659
Gi (20) = 0

Qi (1) = 0
Qi (2) = 0
Qi (3) = 0.69
Qi (4) = 0
Qi (5) = 0
Qi (6) = 1.06775
Qi (7) = 0.633276
Qi (8) = 0
Qi (9) = 0
Qi (10) = 0
Qi (11) = 0
Qi (12) = 0
Qi (13) = 0
Qi (14) = 0
Qi (15) = 0
Qi (16) = 0
Qi (17) = 0
Qi (18) = 0
Qi (19) = 0

Qi(20) = 0

Fi(1) = 0
 Fi(2) = 0
 Fi(3) = 0
 Fi(4) = 0
 Fi(5) = 0
 Fi(6) = 0
 Fi(7) = 0
 Fi(8) = 1
 Fi(9) = 0
 Fi(10) = 0
 Fi(11) = 0
 Fi(12) = 0
 Fi(13) = 0
 Fi(14) = 0
 Fi(15) = 0
 Fi(16) = 0
 Fi(17) = 0
 Fi(18) = 0
 Fi(19) = 0
 Fi(20) = 0

Si(1) = 0
 Si(2) = 0
 Si(3) = 0
 Si(4) = 0
 Si(5) = 0
 Si(6) = 1.5822
 Si(7) = 0.39
 Si(8) = 0
 Si(9) = 0
 Si(10) = 0
 Si(11) = 0
 Si(12) = 0
 Si(13) = 0
 Si(14) = 0
 Si(15) = 0
 Si(16) = 0
 Si(17) = 0
 Si(18) = 0
 Si(19) = 0
 Si(20) = 0

Wi(1) = 0
 Wi(2) = 0
 Wi(3) = 0
 Wi(4) = 0
 Wi(5) = 0
 Wi(6) = 1
 Wi(7) = 0
 Wi(8) = 0
 Wi(9) = 0
 Wi(10) = 0
 Wi(11) = 0
 Wi(12) = 0
 Wi(13) = 0
 Wi(14) = 0
 Wi(15) = 0
 Wi(16) = 0
 Wi(17) = 0
 Wi(18) = 0
 Wi(19) = 0
 Wi(20) = 0

```

For ia = 1 To 20
  For ib = 1 To 20
    Eijo(ia, ib) = 1
    Uij(ia, ib) = 1
    Kij(ia, ib) = 1
    Gijo(ia, ib) = 1
  Next
Next
    
```

Eijo(1, 2) = 0.97164
 Eijo(1, 3) = 0.960644
 Eijo(1, 5) = 0.994635

Ei jo(1, 6) = 0.708218
Ei jo(1, 7) = 0.931484
Ei jo(1, 8) = 1.17052
Ei jo(1, 9) = 0.990126
Ei jo(1, 11) = 1.01953
Ei jo(1, 12) = 0.989844
Ei jo(1, 13) = 1.00235
Ei jo(1, 14) = 0.999268
Ei jo(1, 15) = 1.107274
Ei jo(1, 16) = 0.88088
Ei jo(1, 17) = 0.880973
Ei jo(1, 18) = 0.881067
Ei jo(1, 19) = 0.881161
Ei jo(2, 3) = 1.02274
Ei jo(2, 4) = 0.97012
Ei jo(2, 5) = 0.945939
Ei jo(2, 6) = 0.746954
Ei jo(2, 7) = 0.902271
Ei jo(2, 8) = 1.08632
Ei jo(2, 9) = 1.00571
Ei jo(2, 10) = 1.021
Ei jo(2, 11) = 0.946914
Ei jo(2, 12) = 0.973384
Ei jo(2, 13) = 0.95934
Ei jo(2, 14) = 0.94552
Ei jo(3, 4) = 0.925053
Ei jo(3, 5) = 0.960237
Ei jo(3, 6) = 0.849408
Ei jo(3, 7) = 0.955052
Ei jo(3, 8) = 1.28179
Ei jo(3, 9) = 1.5
Ei jo(3, 11) = 0.906849
Ei jo(3, 12) = 0.897362
Ei jo(3, 13) = 0.726255
Ei jo(3, 14) = 0.859764
Ei jo(3, 15) = 0.855134
Ei jo(3, 16) = 0.831229
Ei jo(3, 17) = 0.80831
Ei jo(3, 18) = 0.786323
Ei jo(3, 19) = 0.765171
Ei jo(4, 5) = 1.02256
Ei jo(4, 6) = 0.693168
Ei jo(4, 7) = 0.946871
Ei jo(4, 8) = 1.16446
Uij(4, 11) = 1.25
Ei jo(4, 12) = 1.01306
Uij(4, 13) = 1.25
Ei jo(4, 14) = 1.00532
Ei jo(5, 8) = 1.034787
Ei jo(5, 12) = 1.0049
Ei jo(7, 15) = 1.008692
Ei jo(7, 16) = 1.010126
Ei jo(7, 17) = 1.011501
Ei jo(7, 18) = 1.012821
Ei jo(7, 19) = 1.014089
Ei jo(8, 9) = 1.1
Ei jo(8, 11) = 1.3
Ei jo(8, 12) = 1.3
Uij(1, 2) = 0.886106
Uij(1, 3) = 0.963827
Uij(1, 5) = 0.990877
Uij(1, 7) = 0.736833
Uij(1, 8) = 1.15639
Uij(1, 12) = 0.992291
Uij(1, 14) = 1.00367
Uij(1, 15) = 1.302576
Uij(1, 16) = 1.191904
Uij(1, 17) = 1.205769
Uij(1, 18) = 1.219634
Uij(1, 19) = 1.233498
Uij(2, 3) = 0.835058
Uij(2, 4) = 0.816431
Uij(2, 5) = 0.915502
Uij(2, 7) = 0.993476
Uij(2, 8) = 0.408838
Uij(2, 12) = 0.993556
Uij(3, 4) = 0.96987

```

Gijo(3, 6) = 1.67309
Uij(3, 7) = 1.04529
Uij(3, 9) = 0.9
Uij(3, 15) = 1.066638
Uij(3, 16) = 1.077634
Uij(3, 17) = 1.088178
Uij(3, 18) = 1.098291
Uij(3, 19) = 1.108021
Uij(4, 5) = 1.065173
Uij(4, 7) = 0.971926
Uij(4, 8) = 1.61666
Uij(4, 12) = 1.25
Uij(4, 14) = 1.25
Uij(7, 15) = 1.028973
Uij(7, 16) = 1.033754
Uij(7, 17) = 1.038338
Uij(7, 18) = 1.042735
Uij(7, 19) = 1.046966
Kij(1, 2) = 1.00363
Kij(1, 3) = 0.995933
Kij(1, 5) = 1.007619
Kij(1, 7) = 1.00008
Kij(1, 8) = 1.02326
Kij(1, 12) = 0.997596
Kij(1, 14) = 1.002529
Kij(1, 15) = 0.982962
Kij(1, 16) = 0.983565
Kij(1, 17) = 0.982707
Kij(1, 18) = 0.981849
Kij(1, 19) = 0.980991
Kij(2, 3) = 0.982361
Kij(2, 4) = 1.00796
Kij(2, 7) = 0.942596
Kij(2, 8) = 1.03227
Kij(3, 4) = 1.00851
Kij(3, 7) = 1.00779
Kij(3, 15) = 0.910183
Kij(3, 16) = 0.895362
Kij(3, 17) = 0.881152
Kij(3, 18) = 0.86752
Kij(3, 19) = 0.854406
Kij(4, 5) = 0.986893
Kij(4, 7) = 0.999969
Kij(4, 8) = 1.02034
Kij(7, 15) = 0.96813
Kij(7, 16) = 0.96287
Kij(7, 17) = 0.957828
Kij(7, 18) = 0.952441
Kij(7, 19) = 0.948338
Gijo(1, 3) = 0.807653
Gijo(1, 8) = 1.95731
Gijo(2, 3) = 0.982746
Gijo(3, 4) = 0.370296

```

```

For i = 1 To 19
  For j = i To 20
    Eijo(j, i) = Eijo(i, j)
    Uij(j, i) = Uij(i, j)
    Kij(j, i) = Kij(i, j)
    Gijo(j, i) = Gijo(i, j)
  Next
Next

```

M = 0

```

For i = 1 To 19
  M = M + mx(i) * x(i)
Next

```

```

Massa = M
sum1 = 0
sum2 = 0

```

```

For i = 1 To 19
  For j = (i + 1) To 20
    sum1 = sum1 + x(i) * x(j) * ((Kij(i, j) ^ 5) - 1) * ((Ki(i) * Ki(j)) ^ 2.5)
  Next
Next

```

Next

For i = 1 To 20

sum2 = sum2 + x(i) * (Ki(i) ^ 2.5)

Next

K = ((sum2 ^ 2) + 2 * sum1) ^ 0.2

sum1 = 0

sum2 = 0

For n = 1 To 18

sum1 = 0

For i = 1 To 20

For j = 1 To 20

$$\text{sum1} = \text{sum1} + x(i) * x(j) * ((Ei(jo(i, j) * ((Ei(i) * Ei(j)) ^ 0.5)) ^ ux(n)) * ((Ki(i) * Ki(j)) ^ 1.5) * (((Gij(jo(i, j) * (Gi(i) + Gi(j)) / 2) + 1 - GX(n)) ^ GX(n)) * ((Qi(i) * Qi(j) + 1 - qx(n)) ^ qx(n)) * (((Fi(i) ^ 0.5) * (Fi(j) ^ 0.5) + 1 - FX(n)) ^ FX(n)) * ((Si(i) * Si(j) + 1 - sx(n)) ^ sx(n)) * (Wi(i) * Wi(j) + 1 - wx(n)) ^ wx(n))$$

Next

Next

sum2 = sum2 + ax(n) * (T ^ (-ux(n))) * sum1

Next

B = sum2

'Cálculo derivada parcial ddBdT

sum1 = 0

sum2 = 0

n = 0

For n = 1 To 18

sum1 = 0

For i = 1 To 20

For j = 1 To 20

$$\text{sum1} = \text{sum1} + x(i) * x(j) * ((Ei(jo(i, j) * ((Ei(i) * Ei(j)) ^ 0.5)) ^ ux(n)) * ((Ki(i) * Ki(j)) ^ 1.5) * (((Gij(jo(i, j) * (Gi(i) + Gi(j)) / 2) + 1 - GX(n)) ^ GX(n)) * ((Qi(i) * Qi(j) + 1 - qx(n)) ^ qx(n)) * (((Fi(i) ^ 0.5) * (Fi(j) ^ 0.5) + 1 - FX(n)) ^ FX(n)) * ((Si(i) * Si(j) + 1 - sx(n)) ^ sx(n)) * (Wi(i) * Wi(j) + 1 - wx(n)) ^ wx(n))$$

Next

Next

sum2 = sum2 + ax(n) * ux(n) * (T ^ (-ux(n) + 1))) * sum1

Next

Next

ddBdT = -sum2

' Fim do Cálculo derivada parcial ddBdT

'Cálculo derivada dd2BbT2

sum1 = 0

sum2 = 0

n = 0

For n = 1 To 18

sum1 = 0

For i = 1 To 20

For j = 1 To 20

$$\text{sum1} = \text{sum1} + x(i) * x(j) * ((Ei(jo(i, j) * ((Ei(i) * Ei(j)) ^ 0.5)) ^ ux(n)) * ((Ki(i) * Ki(j)) ^ 1.5) * (((Gij(jo(i, j) * (Gi(i) + Gi(j)) / 2) + 1 - GX(n)) ^ GX(n)) * ((Qi(i) * Qi(j) + 1 - qx(n)) ^ qx(n)) * (((Fi(i) ^ 0.5) * (Fi(j) ^ 0.5) + 1 - FX(n)) ^ FX(n)) * ((Si(i) * Si(j) + 1 - sx(n)) ^ sx(n)) * (Wi(i) * Wi(j) + 1 - wx(n)) ^ wx(n))$$

Next

Next

sum2 = sum2 + ax(n) * (ux(n) * (ux(n) + 1)) * (T ^ (-ux(n) + 2))) * sum1

Next

Next

dd2BbT2 = sum2

'Fim do Cálculo derivada dd2BbT2

sum1 = 0

sum2 = 0

Algoritmo - 16

```
For i = 1 To 19
  For j = i + 1 To 20
    sum1 = sum1 + x(i) * x(j) * (((Uij(i, j)) ^ 5) - 1) * ((Ei(i) * Ei(j)) ^ 2.5)
  Next
Next

For i = 1 To 20
  sum2 = sum2 + x(i) * (Ei(i) ^ 2.5)
Next

U = ((sum2 ^ 2) + 2 * sum1) ^ 0.2

sum1 = 0
sum2 = 0

For i = 1 To 19
  For j = (i + 1) To 20
    sum1 = sum1 + x(i) * x(j) * (Gij(i, j) - 1) * (Gi(i) + Gi(j))
  Next
Next

For i = 1 To 20
  sum2 = sum2 + x(i) * Gi(i)
Next

G = sum1 + sum2

Q = 0

For i = 1 To 20
  Q = Q + x(i) * Qi(i)
Next

F = 0

For i = 1 To 20
  F = F + (x(i) ^ 2) * Fi(i)
Next

i = 1
d2 = 1
d = 0

While i <> 0
  i = i + 1
  If i = 20000 Then
    Exit Function
  End If
  d = d2 * 0.001

  sum1 = 0
  sum2 = 0

  For n = 13 To 58
    sum1 = sum1 + (ax(n) * ((G + 1 - GX(n)) ^ GX(n)) * (((Q ^ 2) + 1 - qx(n)) ^ qx(n)) * ((F + 1 -
FX(n)) ^ FX(n)) * (U ^ ux(n))) * (T ^ (-ux(n))) * (bx(n) - cx(n) * kx(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ kx(n)))
    * ((d * (K ^ 3)) ^ bx(n)) * Exp((-cx(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ kx(n))))
  Next

  For n = 13 To 18
    sum2 = sum2 + (ax(n) * ((G + 1 - GX(n)) ^ GX(n)) * (((Q ^ 2) + 1 - qx(n)) ^ qx(n)) * ((F + 1 -
FX(n)) ^ FX(n)) * (U ^ ux(n))) * (T ^ (-ux(n)))
  Next

  Z = 1 + B * d - d * (K ^ 3) * sum2 + sum1

  d2 = P / (R * T * Z)

  If d * 1000 > d2 Then
    If (d * 1000 - d2) < 0.0001 Then
      i = 0
    End If
  Else
    If (d2 - d * 1000) < 0.0001 Then
```

Algoritmo - 17

```
        i = 0
    End If
End If

Wend

par = 28.96256 / (R * 0.001 * T / (P * 0.000001) - 0.12527 + 0.000591 * T - 0.000000662 * T * T)

Gr = M * P * 0.000001 / (Z * R * 0.001 * T * par)
Densidade = d2

'Cálculo derivada parcial ddZdt
i = 1
d2 = 1
d = 0

While i <> 0
    i = i + 1
    If i = 20000 Then
        Exit Function
    End If
    d = d2 * 0.001

    sum1 = 0
    sum2 = 0

    For n = 13 To 58
        sum1 = sum1 + ux(n) * (ax(n) * ((G + 1 - GX(n)) ^ GX(n)) * (((Q ^ 2) + 1 - qx(n)) ^ qx(n)) * ((F + 1 - FX(n)) ^ FX(n)) * (U ^ ux(n))) * (T ^ (-(ux(n) + 1))) * (bx(n) - cx(n) * kx(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ kx(n))) * ((d * (K ^ 3)) ^ bx(n)) * Exp((-cx(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ kx(n))))
    Next

    For n = 13 To 18
        sum2 = sum2 + ux(n) * (ax(n) * ((G + 1 - GX(n)) ^ GX(n)) * (((Q ^ 2) + 1 - qx(n)) ^ qx(n)) * ((F + 1 - FX(n)) ^ FX(n)) * (U ^ ux(n))) * (T ^ (-(ux(n) + 1)))
    Next

    ddZdt = (d * ddBdT) + d * (K ^ 3) * sum2 - sum1

    d2 = P / (R * T * Z)

    If d * 1000 > d2 Then
        If (d * 1000 - d2) < 0.0001 Then
            i = 0
        End If
    Else
        If (d2 - d * 1000) < 0.0001 Then
            i = 0
        End If
    End If

Wend

'Fim Cálculo derivada parcial ddZdt

'Cálculo derivada dd2ZdT2
i = 1
d2 = 1
d = 0

While i <> 0
    i = i + 1
    If i = 20000 Then
        Exit Function
    End If
    d = d2 * 0.001

    sum1 = 0
    sum2 = 0

    For n = 13 To 58
        sum1 = sum1 + (ux(n) * (ux(n) + 1)) * (ax(n) * ((G + 1 - GX(n)) ^ GX(n)) * (((Q ^ 2) + 1 - qx(n)) ^ qx(n)) * ((F + 1 - FX(n)) ^ FX(n)) * (U ^ ux(n))) * (T ^ (-(ux(n) + 2))) * (bx(n) - cx(n) * kx(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ kx(n))) * ((d * (K ^ 3)) ^ bx(n)) * Exp((-cx(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ kx(n))))
    Next
```

Next

For n = 13 To 18

$$\text{sum2} = \text{sum2} + (\text{ux}(n) * (\text{ux}(n) + 1)) * (\text{ax}(n) * ((G + 1 - \text{GX}(n)) ^ \text{GX}(n)) * (((Q ^ 2) + 1 - \text{qx}(n)) ^ \text{qx}(n)) * ((F + 1 - \text{FX}(n)) ^ \text{FX}(n)) * (U ^ \text{ux}(n))) * (T ^ (-\text{ux}(n) + 2)))$$

Next

$$\text{ddd2ZdT2} = (d * \text{dd2BbT2}) - d * (K ^ 3) * \text{sum2} + \text{sum1}$$

$$d2 = P / (R * T * Z)$$

If d * 1000 > d2 Then

If (d * 1000 - d2) < 0.0001 Then

i = 0

End If

Else

If (d2 - d * 1000) < 0.0001 Then

i = 0

End If

End If

Wend

' Fim Cálculo derivada dd2ZdT2

'Cálculo derivada ddZdp

i = 1

d2 = 1

d = 0

While i <> 0

i = i + 1

If i = 20000 Then

Exit Function

End If

d = d2 * 0.001

sum1 = 0

sum2 = 0

sum3 = 0

sum4 = 0

For n = 13 To 58

$$\text{sum1} = \text{sum1} + (\text{ax}(n) * ((G + 1 - \text{GX}(n)) ^ \text{GX}(n)) * (((Q ^ 2) + 1 - \text{qx}(n)) ^ \text{qx}(n)) * ((F + 1 - \text{FX}(n)) ^ \text{FX}(n)) * (U ^ \text{ux}(n))) * (T ^ (-\text{ux}(n))) * (-\text{cx}(n) * (\text{kx}(n) ^ 2) * ((d * (K ^ 3)) ^ (\text{kx}(n) - 1))) * ((d * (K ^ 3)) ^ \text{bx}(n)) * \text{Exp}(-\text{cx}(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ \text{kx}(n))))$$

Next

For n = 13 To 58

$$\text{sum2} = \text{sum2} + (\text{ax}(n) * ((G + 1 - \text{GX}(n)) ^ \text{GX}(n)) * (((Q ^ 2) + 1 - \text{qx}(n)) ^ \text{qx}(n)) * ((F + 1 - \text{FX}(n)) ^ \text{FX}(n)) * (U ^ \text{ux}(n))) * (T ^ (-\text{ux}(n))) * (\text{bx}(n) - \text{cx}(n) * \text{kx}(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ \text{kx}(n))) * (\text{bx}(n)) * ((d * (K ^ 3)) ^ (\text{bx}(n) - 1)) * \text{Exp}(-\text{cx}(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ \text{kx}(n))))$$

Next

For n = 13 To 58

$$\text{sum3} = \text{sum3} + (\text{ax}(n) * ((G + 1 - \text{GX}(n)) ^ \text{GX}(n)) * (((Q ^ 2) + 1 - \text{qx}(n)) ^ \text{qx}(n)) * ((F + 1 - \text{FX}(n)) ^ \text{FX}(n)) * (U ^ \text{ux}(n))) * (T ^ (-\text{ux}(n))) * (\text{bx}(n) - \text{cx}(n) * \text{kx}(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ \text{kx}(n))) * ((d * (K ^ 3)) ^ \text{bx}(n)) * (\text{cx}(n) * \text{kx}(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ (\text{kx}(n) - 1))) * \text{Exp}(-\text{cx}(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ \text{kx}(n))))$$

Next

For n = 13 To 18

$$\text{sum4} = \text{sum4} + (\text{ax}(n) * ((G + 1 - \text{GX}(n)) ^ \text{GX}(n)) * (((Q ^ 2) + 1 - \text{qx}(n)) ^ \text{qx}(n)) * ((F + 1 - \text{FX}(n)) ^ \text{FX}(n)) * (U ^ \text{ux}(n))) * (T ^ (-\text{ux}(n)))$$

Next

sum4 = (B / (K ^ 3)) - sum4

$$\text{dddZdp} = (K ^ 3) * (\text{sum4} + \text{sum1} + \text{sum2} - \text{sum3}) \quad '(d * \text{dd2BbT2}) - d * (K ^ 3) * \text{sum2} + \text{sum1}$$

$$d2 = P / (R * T * Z)$$

If d * 1000 > d2 Then

If (d * 1000 - d2) < 0.0001 Then

i = 0

```
End If
Else
  If (d2 - d * 1000) < 0.0001 Then
    i = 0
  End If
End If
Wend
```

```
'Fim Cálculo derivada de ddZdp
```

```
Wend
```

```
'Inicialização das variáveis para ponderação do Cálculo de Cp0 - Capacidade calorífica a pressão constante - Gás ideal
```

```
'Metano CH4
```

```
CT(1, 1) = -29776.4
CT(1, 2) = 7.95454
CT(1, 3) = 43.9417
CT(1, 4) = 1037.09
CT(1, 5) = 1.56373
CT(1, 6) = 813.205
CT(1, 7) = -24.9027
CT(1, 8) = 1019.98
CT(1, 9) = -10.1601
CT(1, 10) = 1070.14
CT(1, 11) = -20.0615
```

```
'Nitrogênio NO2
```

```
CT(2, 1) = -3495.34
CT(2, 2) = 6.95587
CT(2, 3) = 0.272892
CT(2, 4) = 662.738
CT(2, 5) = -0.291318
CT(2, 6) = -680.562
CT(2, 7) = 1.7898
CT(2, 8) = 1740.06
CT(2, 9) = 0
CT(2, 10) = 100
CT(2, 11) = 4.49823
```

```
'Dióxido de carbono CO2
```

```
CT(3, 1) = 20.7307
CT(3, 2) = 6.96237
CT(3, 3) = 2.68645
CT(3, 4) = 500.371
CT(3, 5) = -2.56429
CT(3, 6) = -530.443
CT(3, 7) = 3.91921
CT(3, 8) = 500.198
CT(3, 9) = 2.1329
CT(3, 10) = 2197.22
CT(3, 11) = 5.81381
```

```
'Etano C2H6
```

```
CT(4, 1) = -37524.4
CT(4, 2) = 7.98139
CT(4, 3) = 24.3668
CT(4, 4) = 752.32
CT(4, 5) = 3.5399
CT(4, 6) = 272.846
CT(4, 7) = 8.44724
CT(4, 8) = 1020.13
CT(4, 9) = -13.2732
CT(4, 10) = 869.51
CT(4, 11) = -22.401
```

```
'Propano C3H8
```

```
CT(5, 1) = -56072.1
CT(5, 2) = 8.14319
CT(5, 3) = 37.0629
CT(5, 4) = 735.402
CT(5, 5) = 9.38159
CT(5, 6) = 247.19
CT(5, 7) = 13.4556
```

CT(5, 8) = 1454.78
CT(5, 9) = -11.7342
CT(5, 10) = 984.518
CT(5, 11) = -24.401

'Água H2O

CT(6, 1) = -13773.1
CT(6, 2) = 7.97183
CT(6, 3) = 6.27078
CT(6, 4) = 2572.63
CT(6, 5) = 2.0501
CT(6, 6) = 1156.72
CT(6, 7) = 0
CT(6, 8) = 100
CT(6, 9) = 0
CT(6, 10) = 100
CT(6, 11) = -3.24989

'Sulfeto de hidrogênio H2S

CT(7, 1) = -10085.4
CT(7, 2) = 7.9468
CT(7, 3) = -0.0838
CT(7, 4) = 433.801
CT(7, 5) = 2.85539
CT(7, 6) = 843.792
CT(7, 7) = 6.31595
CT(7, 8) = 1481.43
CT(7, 9) = -2.88457
CT(7, 10) = 1102.23
CT(7, 11) = -0.51551

'Hidrogênio H2

CT(8, 1) = -5565.6
CT(8, 2) = 6.66789
CT(8, 3) = 2.33458
CT(8, 4) = 2584.98
CT(8, 5) = 0.749019
CT(8, 6) = 559.656
CT(8, 7) = 0
CT(8, 8) = 100
CT(8, 9) = 0
CT(8, 10) = 100
CT(8, 11) = -7.94821

'Monóxido de carbono CO

CT(9, 1) = -2753.49
CT(9, 2) = 6.95854
CT(9, 3) = 2.02441
CT(9, 4) = 1541.22
CT(9, 5) = 0.096774
CT(9, 6) = 3674.81
CT(9, 7) = 0
CT(9, 8) = 100
CT(9, 9) = 0
CT(9, 10) = 100
CT(9, 11) = 6.23387

'Oxigênio O2

CT(10, 1) = -3497.45
CT(10, 2) = 6.96302
CT(10, 3) = 2.40013
CT(10, 4) = 2522.05
CT(10, 5) = 2.21752
CT(10, 6) = 1154.15
CT(10, 7) = 0
CT(10, 8) = 100
CT(10, 9) = 0
CT(10, 10) = 100
CT(10, 11) = 9.19749

'Isobutano C4H10

CT(11, 1) = -72387
CT(11, 2) = 17.8143
CT(11, 3) = 58.2062
CT(11, 4) = 1787.39
CT(11, 5) = 40.7621
CT(11, 6) = 808.645

CT(11, 7) = 0
CT(11, 8) = 100
CT(11, 9) = 0
CT(11, 10) = 100
CT(11, 11) = -44.1341

'NButano C4H10

CT(12, 1) = -72674.8
CT(12, 2) = 18.6383
CT(12, 3) = 57.4178
CT(12, 4) = 1792.73
CT(12, 5) = 38.6599
CT(12, 6) = 814.151
CT(12, 7) = 0
CT(12, 8) = 100
CT(12, 9) = 0
CT(12, 10) = 100
CT(12, 11) = -46.1938

'Isopentano C5H12

CT(13, 1) = -91505.5
CT(13, 2) = 21.3861
CT(13, 3) = 74.341
CT(13, 4) = 1701.58
CT(13, 5) = 47.0587
CT(13, 6) = 775.899
CT(13, 7) = 0
CT(13, 8) = 100
CT(13, 9) = 0
CT(13, 10) = 100
CT(13, 11) = -60.2474

'Npentano C5H12

CT(14, 1) = -83845.2
CT(14, 2) = 22.5012
CT(14, 3) = 69.5789
CT(14, 4) = 1719.58
CT(14, 5) = 46.2164
CT(14, 6) = 802.174
CT(14, 7) = 0
CT(14, 8) = 100
CT(14, 9) = 0
CT(14, 10) = 100
CT(14, 11) = -62.2197

'NHexano

CT(15, 1) = -94982.5
CT(15, 2) = 26.6225
CT(15, 3) = 80.3819
CT(15, 4) = 1718.49
CT(15, 5) = 55.6598
CT(15, 6) = 802.069
CT(15, 7) = 0
CT(15, 8) = 100
CT(15, 9) = 0
CT(15, 10) = 100
CT(15, 11) = -77.5366

'NHeptano C7H16

CT(16, 1) = -103353
CT(16, 2) = 30.4029
CT(16, 3) = 90.6941
CT(16, 4) = 1669.32
CT(16, 5) = 63.2028
CT(16, 6) = 786.001
CT(16, 7) = 0
CT(16, 8) = 100
CT(16, 9) = 0
CT(16, 10) = 100
CT(16, 11) = -92.0164

'NOctano C8H18

CT(17, 1) = -109674
CT(17, 2) = 34.0847
CT(17, 3) = 100.253
CT(17, 4) = 1611.55
CT(17, 5) = 69.7675

Algoritmo - 22

```
CT(17, 6) = 768.847
CT(17, 7) = 0
CT(17, 8) = 100
CT(17, 9) = 0
CT(17, 10) = 100
CT(17, 11) = -106.149
```

'NNonano C9H20

```
CT(18, 1) = -122599
CT(18, 2) = 38.5014
CT(18, 3) = 111.446
CT(18, 4) = 1646.48
CT(18, 5) = 80.5015
CT(18, 6) = 781.588
CT(18, 7) = 0
CT(18, 8) = 100
CT(18, 9) = 0
CT(18, 10) = 100
CT(18, 11) = -122.444
```

'NDecano

```
CT(19, 1) = -133564
CT(19, 2) = 42.7143
CT(19, 3) = 122.173
CT(19, 4) = 1654.85
CT(19, 5) = 90.2255
CT(19, 6) = 785.564
CT(19, 7) = 0
CT(19, 8) = 100
CT(19, 9) = 0
CT(19, 10) = 100
CT(19, 11) = -138.006
```

'Hélio He

```
CT(20, 1) = 0
CT(20, 2) = 4.968
CT(20, 3) = 0
CT(20, 4) = 100
CT(20, 5) = 0
CT(20, 6) = 100
CT(20, 7) = 0
CT(20, 8) = 100
CT(20, 9) = 0
CT(20, 10) = 100
CT(20, 11) = 1.8198
```

'Argônio Ar

```
CT(21, 1) = 0
CT(21, 2) = 4.968
CT(21, 3) = 0
CT(21, 4) = 100
CT(21, 5) = 0
CT(21, 6) = 100
CT(21, 7) = 0
CT(21, 8) = 100
CT(21, 9) = 0
CT(21, 10) = 100
CT(21, 11) = 8.6776
```

'Fim da inicialização das variáveis para ponderação do Cálculo de Cp0 "Capacidade calorífica a pressão constante - Gás ideal"

'Inicio do cálculo de Cp0 - Capacidade calorífica a pressão constante - Gás ideal

i = 1 ' Variável de acréscimo para o cálculo de Cpo - Levando em consideração a Tabela4, pag 10 da AGA 10. Não foi levado em consideração os valores do ARGON.

cp0 = 0 'Capacidade calorífica a pressão constante - Gás ideal

cpx = 0 'Variável de acréscimo(variável que calcula a ponderação de Cp0) para o cálculo de Cp0
DX = 0

For i = 1 To 20

 cpx = 0

 sinhDT = SinH(CT(i, 4) / tempet) 'Seno de D(Depende do componente - Valor tabelado - Tabela 4 A

```

GA10) / Temperatura
  coshFT = CosH(CT(i, 6) / tempet) 'Seno de F(Depende do componente - Valor tabelado - Tabela 4 A
GA10) / Temperatura
  sinhHT = SinH(CT(i, 8) / tempet) 'Seno de H(Depende do componente - Valor tabelado - Tabela 4 A
GA10) / Temperatura
  coshJT = CosH(CT(i, 10) / tempet) 'Seno de J(Depende do componente - Valor tabelado - Tabela 4
AGA10) / Temperatura

  DT = (CT(i, 4) / tempet) / sinhDT
  FT = (CT(i, 6) / tempet) / coshFT
  HT = (CT(i, 8) / tempet) / sinhHT
  JT = (CT(i, 10) / tempet) / coshJT

  cpx = CT(i, 2) + (CT(i, 3) * (DT ^ 2)) + (CT(i, 5) * (FT ^ 2)) + (CT(i, 7) * (HT ^ 2)) + (CT(i,
9) * (JT ^ 2))
  cpx = cpx * x(i)

  cp0 = cp0 + cpx

Next

  cp0 = (cp0 * 4.184) / Massa 'Valor de Cp0 em KJ/Kg - K

'Fim do cálculo de Cp0

'Inicio do cálculo de Cv - Capacidade calorífica a volume constante - Gás real

  Dim GK_ROOT(1 To 5), GK_WEIGHTS(1 To 5) As Double
  Dim GK_POINTS As Integer
  Dim yx, cxy, cv As Double

  GK_POINTS = 5

  'Inicialização das variáveis para o cálculo da integral de (ddZdt)p - derivada da compre
ssibilidade em relação a temperatura com p constante
  'Inicialização das variáveis para o cálculo da integral de (dd2Zdt2)p - derivada dupla d
a compressibilidade em relação a temperatura com p constante
  GK_ROOT(1) = 0.148874338981631
  GK_ROOT(2) = 0.433395394129247
  GK_ROOT(3) = 0.679409568299024
  GK_ROOT(4) = 0.865063366688985
  GK_ROOT(5) = 0.973906528517172

  GK_WEIGHTS(1) = 0.295524224714753
  GK_WEIGHTS(2) = 0.269266719309996
  GK_WEIGHTS(3) = 0.219086362515982
  GK_WEIGHTS(4) = 0.149451349150581
  GK_WEIGHTS(5) = 6.66713443086881E-02

  'Fim inicialização das variáveis para o cálculo da integral de (ddZdt)p - derivada da co
mpressibilidade em relação a temperatura com p constante
  'Fim inicialização das variáveis para o cálculo da integral de (dd2Zdt2)p - derivada dup
la da compressibilidade em relação a temperatura com p constante

  i = 0

  cxy = 0

For i = 1 To 5

  yx = (Densidade * (1 + GK_ROOT(i))) / 2
  compressibilidade (yx)
  Lc = GK_WEIGHTS(i) * ((2 * DddZdT) + (tempet * Ddd2ZdT2)) / yx
  cxy = cxy + Lc

  yx = (Densidade * (1 - GK_ROOT(i))) / 2
  compressibilidade (yx)
  Lc = GK_WEIGHTS(i) * ((2 * DddZdT) + (tempet * Ddd2ZdT2)) / yx
  cxy = cxy + Lc

```

Next

```
GXK = R * (1 + (tempet * cxy * 0.5 * Densidade))
```

```
cv = (cp0 * Massa) - GXK 'Valor de CV em KJ/Kg - K
```

```
'Fim do cálculo de Cv - Capacidade calorífica a volume constante - Gás real
```

```
'Inicio do cálculo de Cp - Capacidade calorífica a pressão constante - Gás Real
```

```
A = Z + (tempet * ddZdt) ' Cálculo do primeiro membro da formula para o cálculo de Cp
```

```
B = Z + ((Densidade / 1000) * ddZdp) 'Cálculo do segundo membro da formula para o cálculo de Cp
```

```
e Cp
```

```
cp = cv + (R * ((A * A) / B)) 'Cálculo de Cp
```

```
'Fim do cálculo de Cp - Capacidade calorífica a pressão constante - Gás Real
```

```
'Cálculo da Velocidade do Som
```

```
CpCv = (cp / Massa) / (cv / Massa) 'Cálculo de Cp/Cv - Primeiro membro da formula da velocidade do som
```

```
RTM = (R * 1000 * tempet) / Massa 'Cálculo de RT/Mr - Segundo membro da formula da velocidade do som
```

```
ZpddZdp = Z + ((Densidade / 1000) * ddZdp) 'Cálculo de Z + p * ddZdp - Terceiro membro da formula da velocidade do som
```

```
Ws = (CpCv * RTM * ZpddZdp)
```

```
SOS = Sqr(Ws) 'A função SOS (Speed Of Sound) recebe o valor da raiz quadrada de Ws.
```

```
'Fim do cálculo da Velocidade do Som
```

```
End Function
```

```
'Função para cálculo da compressibilidade com densidade como variável
```

```
Function compressibilidade(Den As Double) As Double
```

```
P = pressao
```

```
T = tempet
```

```
Dim Ei(1 To 21) As Double
```

```
Dim Ki(1 To 21) As Double
```

```
Dim Gi(1 To 21) As Double
```

```
Dim Qi(1 To 21) As Double
```

```
Dim Fi(1 To 21) As Double
```

```
Dim Si(1 To 21) As Double
```

```
Dim Wi(1 To 21) As Double
```

```
Dim ax(1 To 59) As Double
```

```
Dim bx(1 To 59) As Double
```

```
Dim cx(1 To 59) As Double
```

```
Dim kx(1 To 59) As Double
```

```
Dim ux(1 To 59) As Double
```

```
Dim GX(1 To 59) As Double
```

```
Dim qx(1 To 59) As Double
```

```
Dim FX(1 To 59) As Double
```

```
Dim sx(1 To 59) As Double
```

```
Dim wx(1 To 59) As Double
```

```
Dim Eiijo(1 To 21, 1 To 21) As Double
```

```
Dim Uij(1 To 21, 1 To 21) As Double
```

```
Dim Kij(1 To 21, 1 To 21) As Double
```

```
Dim Gijo(1 To 21, 1 To 21) As Double
```

```
Dim sum1 As Double
```

```
Dim sum2 As Double
```

```
Dim K As Double
```

```
Dim B As Double
```

```
Dim U As Double
```

```
Dim G As Double
```

```
Dim Q As Double
```

```
Dim F As Double
```

```
Dim d As Double
```

```
Dim Z As Double
```

```
'Dim R As Double
Dim it(1 To 4) As Double
Dim d2 As Double
Dim D3 As Double
Dim Z2 As Double
Dim mx(1 To 21) As Double
Dim M As Double
Dim Gr As Double
Dim par As Double
Dim bi(1 To 3, 1 To 3, 1 To 3) As Double
Dim ci(1 To 3, 1 To 3, 1 To 3, 1 To 3, 1 To 3) As Double
Dim Bi2(1 To 3, 1 To 3) As Double
Dim ci2(1 To 3, 1 To 3) As Double
Dim P2 As Double
Dim T2 As Double
Dim Gr2 As Double
Dim vol As Double
Dim Z3 As Double
Dim testp As Boolean
Dim testt As Boolean
Dim ia As Integer
Dim ib As Integer
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim n As Integer
Dim teste As Integer
```

```
testp = False
testt = False
teste = 0
n = 0
R = 8.31451
```

```
x(1) = xbf(1)
x(2) = xbf(2)
x(3) = xbf(3)
x(4) = xbf(4)
x(5) = xbf(5)
x(6) = xbf(6)
x(7) = xbf(7)
x(8) = xbf(8)
x(9) = xbf(9)
x(10) = xbf(10)
x(11) = xbf(11)
x(12) = xbf(12)
x(13) = xbf(13)
x(14) = xbf(14)
x(15) = xbf(15)
x(16) = xbf(16)
x(17) = xbf(17)
x(18) = xbf(18)
x(19) = xbf(19)
x(20) = xbf(20)
```

```
For i = 1 To 20
    x(i) = x(i) * 0.01
Next
```

```
While n < 2
```

```
mx(1) = 16.043
mx(2) = 28.0135
mx(3) = 44.01
mx(4) = 30.07
mx(5) = 44.097
mx(6) = 18.0153
mx(7) = 34.082
mx(8) = 2.0459
mx(9) = 28.01
mx(10) = 31.9988
mx(11) = 58.123
mx(12) = 58.123
mx(13) = 72.15
mx(14) = 72.15
```

```
mx(15) = 86.177
mx(16) = 100.204
mx(17) = 114.231
mx(18) = 128.258
mx(19) = 142.285
mx(20) = 4.0026

ax(1) = 0.1538326
ax(2) = 1.341953
ax(3) = -2.998583
ax(4) = -0.04831228
ax(5) = 0.3757965
ax(6) = -1.589575
ax(7) = -0.05358847
ax(8) = 0.88659463
ax(9) = -0.71023704
ax(10) = -1.471722
ax(11) = 1.32185035
ax(12) = -0.78665925
ax(13) = 2.29129 * 0.000000001
ax(14) = 0.1576724
ax(15) = -0.4363864
ax(16) = -0.04408159
ax(17) = -0.003433888
ax(18) = 0.03205905
ax(19) = 0.02487355
ax(20) = 0.07332279
ax(21) = -0.001600573
ax(22) = 0.6424706
ax(23) = -0.4162601
ax(24) = -0.06689957
ax(25) = 0.2791795
ax(26) = -0.6966051
ax(27) = -0.002860589
ax(28) = -0.008098836
ax(29) = 3.150547
ax(30) = 0.007224479
ax(31) = -0.7057529
ax(32) = 0.5349792
ax(33) = -0.07931491
ax(34) = -1.418465
ax(35) = -5.99905 * 1E-17
ax(36) = 0.1058402
ax(37) = 0.03431729
ax(38) = -0.007022847
ax(39) = 0.02495587
ax(40) = 0.04296818
ax(41) = 0.7465453
ax(42) = -0.2919613
ax(43) = 7.294616
ax(44) = -9.936757
ax(45) = -0.005399808
ax(46) = -0.2432567
ax(47) = 0.04987016
ax(48) = 0.003733797
ax(49) = 1.874951
ax(50) = 0.002168144
ax(51) = -0.6587164
ax(52) = 0.000205518
ax(53) = 0.009776195
ax(54) = -0.02048708
ax(55) = 0.01557322
ax(56) = 0.006862415
ax(57) = -0.001226752
ax(58) = 0.002850908
```

```
bx(1) = 1
bx(2) = 1
bx(3) = 1
bx(4) = 1
bx(5) = 1
bx(6) = 1
bx(7) = 1
bx(8) = 1
bx(9) = 1
bx(10) = 1
bx(11) = 1
```

```
bx(12) = 1
bx(13) = 1
bx(14) = 1
bx(15) = 1
bx(16) = 1
bx(17) = 1
bx(18) = 1
bx(19) = 2
bx(20) = 2
bx(21) = 2
bx(22) = 2
bx(23) = 2
bx(24) = 2
bx(25) = 2
bx(26) = 2
bx(27) = 2
bx(28) = 3
bx(29) = 3
bx(30) = 3
bx(31) = 3
bx(32) = 3
bx(33) = 3
bx(34) = 3
bx(35) = 3
bx(36) = 3
bx(37) = 3
bx(38) = 4
bx(39) = 4
bx(40) = 4
bx(41) = 4
bx(42) = 4
bx(43) = 4
bx(44) = 4
bx(45) = 5
bx(46) = 5
bx(47) = 5
bx(48) = 5
bx(49) = 5
bx(50) = 6
bx(51) = 6
bx(52) = 7
bx(53) = 7
bx(54) = 8
bx(55) = 8
bx(56) = 8
bx(57) = 9
bx(58) = 9
```

```
cx(1) = 0
cx(2) = 0
cx(3) = 0
cx(4) = 0
cx(5) = 0
cx(6) = 0
cx(7) = 0
cx(8) = 0
cx(9) = 0
cx(10) = 0
cx(11) = 0
cx(12) = 0
cx(13) = 1
cx(14) = 1
cx(15) = 1
cx(16) = 1
cx(17) = 1
cx(18) = 1
cx(19) = 0
cx(20) = 0
cx(21) = 1
cx(22) = 1
cx(23) = 1
cx(24) = 1
cx(25) = 1
cx(26) = 1
cx(27) = 1
cx(28) = 0
cx(29) = 1
```

```
cx(30) = 1
cx(31) = 1
cx(32) = 1
cx(33) = 1
cx(34) = 1
cx(35) = 1
cx(36) = 1
cx(37) = 1
cx(38) = 0
cx(39) = 0
cx(40) = 1
cx(41) = 1
cx(42) = 1
cx(43) = 1
cx(44) = 1
cx(45) = 0
cx(46) = 1
cx(47) = 1
cx(48) = 1
cx(49) = 1
cx(50) = 0
cx(51) = 1
cx(52) = 0
cx(53) = 1
cx(54) = 1
cx(55) = 1
cx(56) = 1
cx(57) = 1
cx(58) = 1
```

```
kx(1) = 0
kx(2) = 0
kx(3) = 0
kx(4) = 0
kx(5) = 0
kx(6) = 0
kx(7) = 0
kx(8) = 0
kx(9) = 0
kx(10) = 0
kx(11) = 0
kx(12) = 0
kx(13) = 3
kx(14) = 2
kx(15) = 2
kx(16) = 2
kx(17) = 4
kx(18) = 4
kx(19) = 0
kx(20) = 0
kx(21) = 2
kx(22) = 2
kx(23) = 2
kx(24) = 4
kx(25) = 4
kx(26) = 4
kx(27) = 4
kx(28) = 0
kx(29) = 1
kx(30) = 1
kx(31) = 2
kx(32) = 2
kx(33) = 3
kx(34) = 3
kx(35) = 4
kx(36) = 4
kx(37) = 4
kx(38) = 0
kx(39) = 0
kx(40) = 2
kx(41) = 2
kx(42) = 2
kx(43) = 4
kx(44) = 4
kx(45) = 0
kx(46) = 2
kx(47) = 2
```

kx(48) = 4
kx(49) = 4
kx(50) = 0
kx(51) = 2
kx(52) = 0
kx(53) = 2
kx(54) = 1
kx(55) = 2
kx(56) = 2
kx(57) = 2
kx(58) = 2

ux(1) = 0
ux(2) = 0.5
ux(3) = 1
ux(4) = 3.5
ux(5) = -0.5
ux(6) = 4.5
ux(7) = 0.5
ux(8) = 7.5
ux(9) = 9.5
ux(10) = 6
ux(11) = 12
ux(12) = 12.5
ux(13) = -6
ux(14) = 2
ux(15) = 3
ux(16) = 2
ux(17) = 2
ux(18) = 11
ux(19) = -0.5
ux(20) = 0.5
ux(21) = 0
ux(22) = 4
ux(23) = 6
ux(24) = 21
ux(25) = 23
ux(26) = 22
ux(27) = -1
ux(28) = -0.5
ux(29) = 7
ux(30) = -1
ux(31) = 6
ux(32) = 4
ux(33) = 1
ux(34) = 9
ux(35) = -13
ux(36) = 21
ux(37) = 8
ux(38) = -0.5
ux(39) = 0
ux(40) = 2
ux(41) = 7
ux(42) = 9
ux(43) = 22
ux(44) = 23
ux(45) = 1
ux(46) = 9
ux(47) = 3
ux(48) = 8
ux(49) = 23
ux(50) = 1.5
ux(51) = 5
ux(52) = -0.5
ux(53) = 4
ux(54) = 7
ux(55) = 3
ux(56) = 0
ux(57) = 1
ux(58) = 0

GX(1) = 0
GX(2) = 0
GX(3) = 0
GX(4) = 0
GX(5) = 1
GX(6) = 1

GX(7) = 0
GX(8) = 0
GX(9) = 0
GX(10) = 0
GX(11) = 0
GX(12) = 0
GX(13) = 0
GX(14) = 0
GX(15) = 0
GX(16) = 0
GX(17) = 0
GX(18) = 0
GX(19) = 0
GX(20) = 0
GX(21) = 0
GX(22) = 0
GX(23) = 0
GX(24) = 0
GX(25) = 1
GX(26) = 0
GX(27) = 0
GX(28) = 0
GX(29) = 1
GX(30) = 0
GX(31) = 0
GX(32) = 1
GX(33) = 1
GX(34) = 1
GX(35) = 0
GX(36) = 0
GX(37) = 0
GX(38) = 0
GX(39) = 0
GX(40) = 0
GX(41) = 0
GX(42) = 0
GX(43) = 0
GX(44) = 0
GX(45) = 0
GX(46) = 0
GX(47) = 0
GX(48) = 0
GX(49) = 0
GX(50) = 0
GX(51) = 1
GX(52) = 0
GX(53) = 0
GX(54) = 1
GX(55) = 0
GX(56) = 1
GX(57) = 0
GX(58) = 0

qx(1) = 0
qx(2) = 0
qx(3) = 0
qx(4) = 0
qx(5) = 0
qx(6) = 0
qx(7) = 1
qx(8) = 0
qx(9) = 0
qx(10) = 0
qx(11) = 0
qx(12) = 0
qx(13) = 0
qx(14) = 0
qx(15) = 0
qx(16) = 1
qx(17) = 0
qx(18) = 0
qx(19) = 0
qx(20) = 0
qx(21) = 0
qx(22) = 0
qx(23) = 0
qx(24) = 0

qx(25) = 0
qx(26) = 1
qx(27) = 0
qx(28) = 1
qx(29) = 0
qx(30) = 0
qx(31) = 0
qx(32) = 0
qx(33) = 0
qx(34) = 0
qx(35) = 0
qx(36) = 0
qx(37) = 1
qx(38) = 0
qx(39) = 0
qx(40) = 0
qx(41) = 0
qx(42) = 1
qx(43) = 0
qx(44) = 0
qx(45) = 0
qx(46) = 0
qx(47) = 1
qx(48) = 0
qx(49) = 1
qx(50) = 0
qx(51) = 0
qx(52) = 1
qx(53) = 0
qx(54) = 0
qx(55) = 0
qx(56) = 0
qx(57) = 0
qx(58) = 1

FX(1) = 0
FX(2) = 0
FX(3) = 0
FX(4) = 0
FX(5) = 0
FX(6) = 0
FX(7) = 0
FX(8) = 0
FX(9) = 0
FX(10) = 0
FX(11) = 0
FX(12) = 0
FX(13) = 1
FX(14) = 0
FX(15) = 0
FX(16) = 0
FX(17) = 0
FX(18) = 0
FX(19) = 0
FX(20) = 0
FX(21) = 0
FX(22) = 0
FX(23) = 0
FX(24) = 0
FX(25) = 0
FX(26) = 0
FX(27) = 1
FX(28) = 0
FX(29) = 0
FX(30) = 1
FX(31) = 0
FX(32) = 0
FX(33) = 0
FX(34) = 0
FX(35) = 1
FX(36) = 0
FX(37) = 0
FX(38) = 0
FX(39) = 0
FX(40) = 0
FX(41) = 0
FX(42) = 0

```
FX(43) = 0
FX(44) = 0
FX(45) = 0
FX(46) = 0
FX(47) = 0
FX(48) = 0
FX(49) = 0
FX(50) = 0
FX(51) = 0
FX(52) = 0
FX(53) = 0
FX(54) = 0
FX(55) = 0
FX(56) = 0
FX(57) = 0
FX(58) = 0
```

```
sx(1) = 0
sx(2) = 0
sx(3) = 0
sx(4) = 0
sx(5) = 0
sx(6) = 0
sx(7) = 0
sx(8) = 1
sx(9) = 1
sx(10) = 0
sx(11) = 0
sx(12) = 0
sx(13) = 0
sx(14) = 0
sx(15) = 0
sx(16) = 0
sx(17) = 0
sx(18) = 0
sx(19) = 0
sx(20) = 0
sx(21) = 0
sx(22) = 0
sx(23) = 0
sx(24) = 0
sx(25) = 0
sx(26) = 0
sx(27) = 0
sx(28) = 0
sx(29) = 0
sx(30) = 0
sx(31) = 0
sx(32) = 0
sx(33) = 0
sx(34) = 0
sx(35) = 0
sx(36) = 0
sx(37) = 0
sx(38) = 0
sx(39) = 0
sx(40) = 0
sx(41) = 0
sx(42) = 0
sx(43) = 0
sx(44) = 0
sx(45) = 0
sx(46) = 0
sx(47) = 0
sx(48) = 0
sx(49) = 0
sx(50) = 0
sx(51) = 0
sx(52) = 0
sx(53) = 0
sx(54) = 0
sx(55) = 0
sx(56) = 0
sx(57) = 0
sx(58) = 0
```

```
wx(1) = 0
```

wx(2) = 0
wx(3) = 0
wx(4) = 0
wx(5) = 0
wx(6) = 0
wx(7) = 0
wx(8) = 0
wx(9) = 0
wx(10) = 1
wx(11) = 1
wx(12) = 1
wx(13) = 0
wx(14) = 0
wx(15) = 0
wx(16) = 0
wx(17) = 0
wx(18) = 0
wx(19) = 0
wx(20) = 0
wx(21) = 0
wx(22) = 0
wx(23) = 0
wx(24) = 0
wx(25) = 0
wx(26) = 0
wx(27) = 0
wx(28) = 0
wx(29) = 0
wx(30) = 0
wx(31) = 0
wx(32) = 0
wx(33) = 0
wx(34) = 0
wx(35) = 0
wx(36) = 0
wx(37) = 0
wx(38) = 0
wx(39) = 0
wx(40) = 0
wx(41) = 0
wx(42) = 0
wx(43) = 0
wx(44) = 0
wx(45) = 0
wx(46) = 0
wx(47) = 0
wx(48) = 0
wx(49) = 0
wx(50) = 0
wx(51) = 0
wx(52) = 0
wx(53) = 0
wx(54) = 0
wx(55) = 0
wx(56) = 0
wx(57) = 0
wx(58) = 0

Ei(1) = 151.3183
Ei(2) = 99.73778
Ei(3) = 241.9606
Ei(4) = 244.1667
Ei(5) = 298.1183
Ei(6) = 514.0156
Ei(7) = 296.355
Ei(8) = 26.95794
Ei(9) = 105.5348
Ei(10) = 122.7667
Ei(11) = 324.0689
Ei(12) = 337.6389
Ei(13) = 365.5999
Ei(14) = 370.6823
Ei(15) = 402.636293
Ei(16) = 427.72263
Ei(17) = 450.325022
Ei(18) = 470.840891
Ei(19) = 489.558373

$$E_i(20) = 2.610111$$

$$\begin{aligned} K_i(1) &= 0.4619255 \\ K_i(2) &= 0.4479153 \\ K_i(3) &= 0.4557489 \\ K_i(4) &= 0.5279209 \\ K_i(5) &= 0.583749 \\ K_i(6) &= 0.3825868 \\ K_i(7) &= 0.4618263 \\ K_i(8) &= 0.3514916 \\ K_i(9) &= 0.4533894 \\ K_i(10) &= 0.4186954 \\ K_i(11) &= 0.6406937 \\ K_i(12) &= 0.6341423 \\ K_i(13) &= 0.6738577 \\ K_i(14) &= 0.6798307 \\ K_i(15) &= 0.7175118 \\ K_i(16) &= 0.7525189 \\ K_i(17) &= 0.784955 \\ K_i(18) &= 0.8152731 \\ K_i(19) &= 0.8437826 \\ K_i(20) &= 0.3589888 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_i(1) &= 0 \\ G_i(2) &= 0.027815 \\ G_i(3) &= 0.189065 \\ G_i(4) &= 0.0793 \\ G_i(5) &= 0.141239 \\ G_i(6) &= 0.3325 \\ G_i(7) &= 0.0885 \\ G_i(8) &= 0.034369 \\ G_i(9) &= 0.038953 \\ G_i(10) &= 0.021 \\ G_i(11) &= 0.256692 \\ G_i(12) &= 0.281835 \\ G_i(13) &= 0.332267 \\ G_i(14) &= 0.366911 \\ G_i(15) &= 0.289731 \\ G_i(16) &= 0.337542 \\ G_i(17) &= 0.383381 \\ G_i(18) &= 0.427354 \\ G_i(19) &= 0.469659 \\ G_i(20) &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_i(1) &= 0 \\ Q_i(2) &= 0 \\ Q_i(3) &= 0.69 \\ Q_i(4) &= 0 \\ Q_i(5) &= 0 \\ Q_i(6) &= 1.06775 \\ Q_i(7) &= 0.633276 \\ Q_i(8) &= 0 \\ Q_i(9) &= 0 \\ Q_i(10) &= 0 \\ Q_i(11) &= 0 \\ Q_i(12) &= 0 \\ Q_i(13) &= 0 \\ Q_i(14) &= 0 \\ Q_i(15) &= 0 \\ Q_i(16) &= 0 \\ Q_i(17) &= 0 \\ Q_i(18) &= 0 \\ Q_i(19) &= 0 \\ Q_i(20) &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_i(1) &= 0 \\ F_i(2) &= 0 \\ F_i(3) &= 0 \\ F_i(4) &= 0 \\ F_i(5) &= 0 \\ F_i(6) &= 0 \\ F_i(7) &= 0 \\ F_i(8) &= 1 \\ F_i(9) &= 0 \\ F_i(10) &= 0 \\ F_i(11) &= 0 \\ F_i(12) &= 0 \end{aligned}$$

```
Fi(13) = 0
Fi(14) = 0
Fi(15) = 0
Fi(16) = 0
Fi(17) = 0
Fi(18) = 0
Fi(19) = 0
Fi(20) = 0
```

```
Si(1) = 0
Si(2) = 0
Si(3) = 0
Si(4) = 0
Si(5) = 0
Si(6) = 1.5822
Si(7) = 0.39
Si(8) = 0
Si(9) = 0
Si(10) = 0
Si(11) = 0
Si(12) = 0
Si(13) = 0
Si(14) = 0
Si(15) = 0
Si(16) = 0
Si(17) = 0
Si(18) = 0
Si(19) = 0
Si(20) = 0
```

```
Wi(1) = 0
Wi(2) = 0
Wi(3) = 0
Wi(4) = 0
Wi(5) = 0
Wi(6) = 1
Wi(7) = 0
Wi(8) = 0
Wi(9) = 0
Wi(10) = 0
Wi(11) = 0
Wi(12) = 0
Wi(13) = 0
Wi(14) = 0
Wi(15) = 0
Wi(16) = 0
Wi(17) = 0
Wi(18) = 0
Wi(19) = 0
Wi(20) = 0
```

```
For ia = 1 To 20
  For ib = 1 To 20
    Eijo(ia, ib) = 1
    Uij(ia, ib) = 1
    Kij(ia, ib) = 1
    Gijo(ia, ib) = 1
  Next
Next
```

```
Eijo(1, 2) = 0.97164
Eijo(1, 3) = 0.960644
Eijo(1, 5) = 0.994635
Eijo(1, 6) = 0.708218
Eijo(1, 7) = 0.931484
Eijo(1, 8) = 1.17052
Eijo(1, 9) = 0.990126
Eijo(1, 11) = 1.01953
Eijo(1, 12) = 0.989844
Eijo(1, 13) = 1.00235
Eijo(1, 14) = 0.999268
Eijo(1, 15) = 1.107274
Eijo(1, 16) = 0.88088
Eijo(1, 17) = 0.880973
Eijo(1, 18) = 0.881067
Eijo(1, 19) = 0.881161
Eijo(2, 3) = 1.02274
```

Ei_jo(2, 4) = 0.97012
Ei_jo(2, 5) = 0.945939
Ei_jo(2, 6) = 0.746954
Ei_jo(2, 7) = 0.902271
Ei_jo(2, 8) = 1.08632
Ei_jo(2, 9) = 1.00571
Ei_jo(2, 10) = 1.021
Ei_jo(2, 11) = 0.946914
Ei_jo(2, 12) = 0.973384
Ei_jo(2, 13) = 0.95934
Ei_jo(2, 14) = 0.94552
Ei_jo(3, 4) = 0.925053
Ei_jo(3, 5) = 0.960237
Ei_jo(3, 6) = 0.849408
Ei_jo(3, 7) = 0.955052
Ei_jo(3, 8) = 1.28179
Ei_jo(3, 9) = 1.5
Ei_jo(3, 11) = 0.906849
Ei_jo(3, 12) = 0.897362
Ei_jo(3, 13) = 0.726255
Ei_jo(3, 14) = 0.859764
Ei_jo(3, 15) = 0.855134
Ei_jo(3, 16) = 0.831229
Ei_jo(3, 17) = 0.80831
Ei_jo(3, 18) = 0.786323
Ei_jo(3, 19) = 0.765171
Ei_jo(4, 5) = 1.02256
Ei_jo(4, 6) = 0.693168
Ei_jo(4, 7) = 0.946871
Ei_jo(4, 8) = 1.16446
Uij(4, 11) = 1.25
Ei_jo(4, 12) = 1.01306
Uij(4, 13) = 1.25
Ei_jo(4, 14) = 1.00532
Ei_jo(5, 8) = 1.034787
Ei_jo(5, 12) = 1.0049
Ei_jo(7, 15) = 1.008692
Ei_jo(7, 16) = 1.010126
Ei_jo(7, 17) = 1.011501
Ei_jo(7, 18) = 1.012821
Ei_jo(7, 19) = 1.014089
Ei_jo(8, 9) = 1.1
Ei_jo(8, 11) = 1.3
Ei_jo(8, 12) = 1.3
Uij(1, 2) = 0.886106
Uij(1, 3) = 0.963827
Uij(1, 5) = 0.990877
Uij(1, 7) = 0.736833
Uij(1, 8) = 1.15639
Uij(1, 12) = 0.992291
Uij(1, 14) = 1.00367
Uij(1, 15) = 1.302576
Uij(1, 16) = 1.191904
Uij(1, 17) = 1.205769
Uij(1, 18) = 1.219634
Uij(1, 19) = 1.233498
Uij(2, 3) = 0.835058
Uij(2, 4) = 0.816431
Uij(2, 5) = 0.915502
Uij(2, 7) = 0.993476
Uij(2, 8) = 0.408838
Uij(2, 12) = 0.993556
Uij(3, 4) = 0.96987
Gij(3, 6) = 1.67309
Uij(3, 7) = 1.04529
Uij(3, 9) = 0.9
Uij(3, 15) = 1.066638
Uij(3, 16) = 1.077634
Uij(3, 17) = 1.088178
Uij(3, 18) = 1.098291
Uij(3, 19) = 1.108021
Uij(4, 5) = 1.065173
Uij(4, 7) = 0.971926
Uij(4, 8) = 1.61666
Uij(4, 12) = 1.25
Uij(4, 14) = 1.25
Uij(7, 15) = 1.028973

```

Uij(7, 16) = 1.033754
Uij(7, 17) = 1.038338
Uij(7, 18) = 1.042735
Uij(7, 19) = 1.046966
Kij(1, 2) = 1.00363
Kij(1, 3) = 0.995933
Kij(1, 5) = 1.007619
Kij(1, 7) = 1.00008
Kij(1, 8) = 1.02326
Kij(1, 12) = 0.997596
Kij(1, 14) = 1.002529
Kij(1, 15) = 0.982962
Kij(1, 16) = 0.983565
Kij(1, 17) = 0.982707
Kij(1, 18) = 0.981849
Kij(1, 19) = 0.980991
Kij(2, 3) = 0.982361
Kij(2, 4) = 1.00796
Kij(2, 7) = 0.942596
Kij(2, 8) = 1.03227
Kij(3, 4) = 1.00851
Kij(3, 7) = 1.00779
Kij(3, 15) = 0.910183
Kij(3, 16) = 0.895362
Kij(3, 17) = 0.881152
Kij(3, 18) = 0.86752
Kij(3, 19) = 0.854406
Kij(4, 5) = 0.986893
Kij(4, 7) = 0.999969
Kij(4, 8) = 1.02034
Kij(7, 15) = 0.96813
Kij(7, 16) = 0.96287
Kij(7, 17) = 0.957828
Kij(7, 18) = 0.952441
Kij(7, 19) = 0.948338
Gijo(1, 3) = 0.807653
Gijo(1, 8) = 1.95731
Gijo(2, 3) = 0.982746
Gijo(3, 4) = 0.370296

```

```

For i = 1 To 19
  For j = i To 20
    Eijo(j, i) = Eijo(i, j)
    Uij(j, i) = Uij(i, j)
    Kij(j, i) = Kij(i, j)
    Gijo(j, i) = Gijo(i, j)
  Next
Next

```

```

Next

```

```

M = 0

```

```

For i = 1 To 19
  M = M + mx(i) * x(i)
Next

```

```

sum1 = 0
sum2 = 0

```

```

For i = 1 To 19
  For j = (i + 1) To 20
    sum1 = sum1 + x(i) * x(j) * ((Kij(i, j) ^ 5) - 1) * ((Ki(i) * Ki(j)) ^ 2.5)
  Next
Next

```

```

For i = 1 To 20
  sum2 = sum2 + x(i) * (Ki(i) ^ 2.5)
Next

```

```

K = ((sum2 ^ 2) + 2 * sum1) ^ 0.2

```

```

sum1 = 0
sum2 = 0

```

```

For n = 1 To 18
  sum1 = 0
  For i = 1 To 20

```

```

    For j = 1 To 20
        sum1 = sum1 + x(i) * x(j) * ((Eij0(i, j) * ((Ei(i) * Ei(j)) ^ 0.5)) ^ ux(n)) * ((Ki(i) * Ki(j)) ^ 1.5) * (((Gij0(i, j) * (Gi(i) + Gi(j)) / 2) + 1 - GX(n)) ^ GX(n)) * ((Qi(i) * Qi(j) + 1 - qx(n)) ^ qx(n)) * (((Fi(i) ^ 0.5) * (Fi(j) ^ 0.5) + 1 - FX(n)) ^ FX(n)) * ((Si(i) * Si(j) + 1 - sx(n)) ^ sx(n)) * (Wi(i) * Wi(j) + 1 - wx(n)) ^ wx(n)
    Next
Next
sum2 = sum2 + ax(n) * (T ^ (-ux(n))) * sum1
Next

B = sum2

'Cálculo Derivada DddBdT
sum1 = 0
sum2 = 0
n = 0

For n = 1 To 18
    sum1 = 0
    For i = 1 To 20
        For j = 1 To 20
            sum1 = sum1 + x(i) * x(j) * ((Eij0(i, j) * ((Ei(i) * Ei(j)) ^ 0.5)) ^ ux(n)) * ((Ki(i) * Ki(j)) ^ 1.5) * (((Gij0(i, j) * (Gi(i) + Gi(j)) / 2) + 1 - GX(n)) ^ GX(n)) * ((Qi(i) * Qi(j) + 1 - qx(n)) ^ qx(n)) * (((Fi(i) ^ 0.5) * (Fi(j) ^ 0.5) + 1 - FX(n)) ^ FX(n)) * ((Si(i) * Si(j) + 1 - sx(n)) ^ sx(n)) * (Wi(i) * Wi(j) + 1 - wx(n)) ^ wx(n)
        Next
    Next
    sum2 = sum2 + ax(n) * ux(n) * (T ^ (-ux(n) + 1)) * sum1
Next
DddBdT = -sum2

'Fim Cálculo derivada DddBdT

'Cálculo Derivada Ddd2BdT2
sum1 = 0
sum2 = 0
n = 0

For n = 1 To 18
    sum1 = 0
    For i = 1 To 20
        For j = 1 To 20
            sum1 = sum1 + x(i) * x(j) * ((Eij0(i, j) * ((Ei(i) * Ei(j)) ^ 0.5)) ^ ux(n)) * ((Ki(i) * Ki(j)) ^ 1.5) * (((Gij0(i, j) * (Gi(i) + Gi(j)) / 2) + 1 - GX(n)) ^ GX(n)) * ((Qi(i) * Qi(j) + 1 - qx(n)) ^ qx(n)) * (((Fi(i) ^ 0.5) * (Fi(j) ^ 0.5) + 1 - FX(n)) ^ FX(n)) * ((Si(i) * Si(j) + 1 - sx(n)) ^ sx(n)) * (Wi(i) * Wi(j) + 1 - wx(n)) ^ wx(n)
        Next
    Next
    sum2 = sum2 + ax(n) * (ux(n) * (ux(n) + 1)) * (T ^ (-ux(n) + 2)) * sum1
Next
Ddd2BdT2 = sum2

'Fim Cálculo Derivada Ddd2BdT2

'Cálculo de Z
sum1 = 0
sum2 = 0

For i = 1 To 19
    For j = i + 1 To 20
        sum1 = sum1 + x(i) * x(j) * (((Uij(i, j)) ^ 5) - 1) * ((Ei(i) * Ei(j)) ^ 2.5)
    Next
Next

For i = 1 To 20
    sum2 = sum2 + x(i) * (Ei(i) ^ 2.5)
Next

U = ((sum2 ^ 2) + 2 * sum1) ^ 0.2

```

```

sum1 = 0
sum2 = 0

For i = 1 To 19
  For j = (i + 1) To 20
    sum1 = sum1 + x(i) * x(j) * (Gijo(i, j) - 1) * (Gi(i) + Gi(j))
  Next
Next

For i = 1 To 20
  sum2 = sum2 + x(i) * Gi(i)
Next

G = sum1 + sum2

Q = 0

For i = 1 To 20
  Q = Q + x(i) * Qi(i)
Next

F = 0

For i = 1 To 20
  F = F + (x(i) ^ 2) * Fi(i)
Next

i = 1
d2 = 1
d = 0

While i <> 0
  i = i + 1
  If i = 20000 Then
    Exit Function
  End If
  d = d2 * 0.001

  sum1 = 0
  sum2 = 0

  For n = 13 To 58
    sum1 = sum1 + (ax(n) * ((G + 1 - GX(n)) ^ GX(n)) * (((Q ^ 2) + 1 - qx(n)) ^ qx(n)) * ((F + 1 -
FX(n)) ^ FX(n)) * (U ^ ux(n))) * (T ^ (-ux(n))) * (bx(n) - cx(n) * kx(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ kx(n)))
* ((d * (K ^ 3)) ^ bx(n)) * Exp((-cx(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ kx(n))))
  Next

  For n = 13 To 18
    sum2 = sum2 + (ax(n) * ((G + 1 - GX(n)) ^ GX(n)) * (((Q ^ 2) + 1 - qx(n)) ^ qx(n)) * ((F + 1 -
FX(n)) ^ FX(n)) * (U ^ ux(n))) * (T ^ (-ux(n)))
  Next

  Zse = 1 + B * d - d * (K ^ 3) * sum2 + sum1

  d2 = Den

  If d * 1000 > d2 Then
    If (d * 1000 - d2) < 0.0001 Then
      i = 0
    End If
  Else
    If (d2 - d * 1000) < 0.0001 Then
      i = 0
    End If
  End If

Wend

par = 28.96256 / (R * 0.001 * T / (P * 0.000001) - 0.12527 + 0.000591 * T - 0.000000662 * T * T)

Gr = M * P * 0.000001 / (Zse * R * 0.001 * T * par)
Densidade2 = d2

```

```
'Fim de cálculo de Z
```

```
'Cálculo Derivada DddZdT
```

```
i = 1
```

```
d2 = 1
```

```
d = 0
```

```
While i <> 0
```

```
i = i + 1
```

```
If i = 20000 Then
```

```
Exit Function
```

```
End If
```

```
d = d2 * 0.001
```

```
sum1 = 0
```

```
sum2 = 0
```

```
For n = 13 To 58
```

```
sum1 = sum1 + ux(n) * (ax(n) * ((G + 1 - GX(n)) ^ GX(n)) * (((Q ^ 2) + 1 - qx(n)) ^ qx(n)) * ((F + 1 - FX(n)) ^ FX(n)) * (U ^ ux(n))) * (T ^ (-(ux(n) + 1))) * (bx(n) - cx(n) * kx(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ kx(n))) * ((d * (K ^ 3)) ^ bx(n)) * Exp((-cx(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ kx(n))))
```

```
Next
```

```
For n = 13 To 18
```

```
sum2 = sum2 + ux(n) * (ax(n) * ((G + 1 - GX(n)) ^ GX(n)) * (((Q ^ 2) + 1 - qx(n)) ^ qx(n)) * ((F + 1 - FX(n)) ^ FX(n)) * (U ^ ux(n))) * (T ^ (-(ux(n) + 1)))
```

```
Next
```

```
DddZdT = (d * ddBdT) + d * (K ^ 3) * sum2 - sum1
```

```
d2 = Den
```

```
If d * 1000 > d2 Then
```

```
If (d * 1000 - d2) < 0.0001 Then
```

```
i = 0
```

```
End If
```

```
Else
```

```
If (d2 - d * 1000) < 0.0001 Then
```

```
i = 0
```

```
End If
```

```
End If
```

```
Wend
```

```
'Fim Cálculo derivada DddZdT
```

```
'Cálculo derivada Ddd2ZdT2
```

```
i = 1
```

```
d2 = 1
```

```
d = 0
```

```
While i <> 0
```

```
i = i + 1
```

```
If i = 20000 Then
```

```
Exit Function
```

```
End If
```

```
d = d2 * 0.001
```

```
sum1 = 0
```

```
sum2 = 0
```

```
For n = 13 To 58
```

```
sum1 = sum1 + (ux(n) * (ux(n) + 1)) * (ax(n) * ((G + 1 - GX(n)) ^ GX(n)) * (((Q ^ 2) + 1 - qx(n)) ^ qx(n)) * ((F + 1 - FX(n)) ^ FX(n)) * (U ^ ux(n))) * (T ^ (-(ux(n) + 2))) * (bx(n) - cx(n) * kx(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ kx(n))) * ((d * (K ^ 3)) ^ bx(n)) * Exp((-cx(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ kx(n))))
```

```
Next
```

```
For n = 13 To 18
```

```
sum2 = sum2 + (ux(n) * (ux(n) + 1)) * (ax(n) * ((G + 1 - GX(n)) ^ GX(n)) * (((Q ^ 2) + 1 - qx(n)) ^ qx(n)) * ((F + 1 - FX(n)) ^ FX(n)) * (U ^ ux(n))) * (T ^ (-(ux(n) + 2)))
```

```
Next
```

```
Ddd2ZdT2 = (d * dd2BbT2) - d * (K ^ 3) * sum2 + sum1
```

```
d2 = Den
```

```
If d * 1000 > d2 Then
  If (d * 1000 - d2) < 0.0001 Then
    i = 0
  End If
Else
  If (d2 - d * 1000) < 0.0001 Then
    i = 0
  End If
End If
```

```
Wend
'Fim Cálculo derivada Ddd2ZdT2
```

```
'Cálculo derivada de DddZdp
```

```
i = 1
d2 = 1
d = 0

While i <> 0
  i = i + 1
  If i = 20000 Then
    Exit Function
  End If
  d = d2 * 0.001
```

```
sum1 = 0
sum2 = 0
sum3 = 0
sum4 = 0
```

```
For n = 13 To 58
  sum1 = sum1 + (ax(n) * ((G + 1 - GX(n)) ^ GX(n)) * (((Q ^ 2) + 1 - qx(n)) ^ qx(n)) * ((F + 1 -
FX(n)) ^ FX(n)) * (U ^ ux(n))) * (T ^ (-ux(n))) * (-cx(n) * (kx(n) ^ 2) * ((d * (K ^ 3)) ^ (kx(n) -
1))) * ((d * (K ^ 3)) ^ bx(n)) * Exp((-cx(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ kx(n))))
Next
```

```
For n = 13 To 58
  sum2 = sum2 + (ax(n) * ((G + 1 - GX(n)) ^ GX(n)) * (((Q ^ 2) + 1 - qx(n)) ^ qx(n)) * ((F + 1 -
FX(n)) ^ FX(n)) * (U ^ ux(n))) * (T ^ (-ux(n))) * (bx(n) - cx(n) * kx(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ kx(n)))
* (bx(n)) * ((d * (K ^ 3)) ^ (bx(n) - 1)) * Exp((-cx(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ kx(n))))
Next
```

```
For n = 13 To 58
  sum3 = sum3 + (ax(n) * ((G + 1 - GX(n)) ^ GX(n)) * (((Q ^ 2) + 1 - qx(n)) ^ qx(n)) * ((F + 1 -
FX(n)) ^ FX(n)) * (U ^ ux(n))) * (T ^ (-ux(n))) * (bx(n) - cx(n) * kx(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ kx(n)))
* ((d * (K ^ 3)) ^ bx(n)) * (cx(n) * kx(n) * ((d * (K ^ 3)) ^ (kx(n) - 1))) * Exp((-cx(n) * ((d *
(K ^ 3)) ^ kx(n))))
Next
```

```
For n = 13 To 18
  sum4 = sum4 + (ax(n) * ((G + 1 - GX(n)) ^ GX(n)) * (((Q ^ 2) + 1 - qx(n)) ^ qx(n)) * ((F + 1 -
FX(n)) ^ FX(n)) * (U ^ ux(n))) * (T ^ (-ux(n)))
Next
sum4 = (B / (K ^ 3)) - sum4
DddZdp = (K ^ 3) * (sum4 + sum1 + sum2 - sum3)      '(d * dd2BbT2) - d * (K ^ 3) * sum2 + sum1
```

```
d2 = Den
```

```
If d * 1000 > d2 Then
  If (d * 1000 - d2) < 0.0001 Then
    i = 0
  End If
Else
  If (d2 - d * 1000) < 0.0001 Then
    i = 0
  End If
End If
```

```
Wend
```

```
'Fim do cálculo derivada DddZdp
```

Wend

'Fim da função para cálculo da compressibilidade com densidade como variável

End Function

' seno hiperbólico

```
Function Sinh(value As Double) As Double
    Dim temp As Double
    temp = Exp(value)
    Sinh = (temp - 1 / temp) / 2
End Function
```

' cosseno hiperbólico

```
Function CosH(value As Double) As Double
    Dim temp As Double
    temp = Exp(value)
    CosH = (temp + 1 / temp) / 2
End Function
```

' tangente hiperbólico

```
Function TanH(value As Double) As Double
    Dim temp As Double
    temp = Exp(value)
    TanH = (temp - 1 / temp) / (temp + 1 / temp)
End Function
```

' cotangente hiperbólico

```
Function Coth(value As Double) As Double
    Dim temp As Double
    temp = Exp(value)
    Coth = (temp + 1 / temp) / (temp - 1 / temp)
End Function
```

' secante hiperbólico

```
Function SecH(value As Double) As Double
    Dim temp As Double
    temp = Exp(value)
    SecH = 2 / (temp + 1 / temp)
End Function
```

' cossecante hiperbólico

```
Function Csch(value As Double) As Double
    Dim temp As Double
    temp = Exp(value)
    Csch = 2 / (temp - 1 / temp)
End Function
```