

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**CÂMPUS MEDIANEIRA**  
**ESPECIALIZAÇÃO EM TECNOLOGIAS DA CADEIA PRODUTIVA DO BIOGÁS**

**THIAGO FERNANDO MAGRINI LOPEZ**

**DIMENSIONAMENTO DE REDE DE TUBULAÇÕES PARA**  
**TRANSPORTE DE BIOGÁS**

**MONOGRAFIA**

**MEDIANEIRA**

**2019**

**THIAGO FERNANDO MAGRINI LOPEZ**

**DIMENSIONAMENTO DE REDE DE TUBULAÇÕES PARA  
TRANSPORTE DE BIOGÁS**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Eduardo Eyng

**MEDIANEIRA**

**2019**



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### TÍTULO DO TRABALHO

por

**THIAGO FERNANDO MAGRINI LOPEZ**

Esta Monografia foi apresentada em 04 de maio de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Eduardo Eyng  
Prof. Orientador

---

Breno Carneiro Pinheiro  
Membro titular

---

Rafael Arioli  
Membro titular

## RESUMO

MAGRINI LOPEZ, Thiago Fernando. **Dimensionamento de rede de tubulações para transporte de biogás.** 2019. 18 páginas. Monografia (Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2019.)

São muitas as barreiras às quais a cadeia de biogás deve superar para que de fato se torne um meio de transformar um passivo ambiental em um ativo econômico. As soluções técnicas aliadas ao objetivo de reduzir custos tanto de aquisição quanto de operação são responsáveis por romper boa parte destas barreiras. Em regiões com vários produtores de biogás próximos de si, uma rede de tubulações possibilita o aproveitamento deste gás combustível em um único local, reduzindo custos comparados a instalações isoladas e/ou transporte por caminhões, seja para dejetos ou para o próprio gás. Desta forma, projetos de engenharia com esta finalidade devem contemplar o dimensionamento da rede de tubulações para transporte de biogás, que possui uma lógica de operação inversa à redes de tubulações para transporte de gás natural, devido às baixas pressões em que o biogás é obtido. Visto isso, o presente estudo realizou o dimensionamento da rede de tubulações do projeto P&D COPEL em Entre Rios do Oeste, Brasil, utilizando as premissas que envolvem a cadeia de biogás. Os resultados mostram que é possível reduzir o diâmetro das tubulações comparando com metodologias atuais, reduzindo custos e aumentando a confiabilidade do sistema.

**Palavras-chave:** Biogás. Energia. Metano.

## ABSTRACT

MAGRINI LOPEZ, Thiago Fernando. **Sizing of pipeline network for biogas transportation**. 2019. 18 pages. Monografia (Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2019.)

There are many barriers that biogas chain must surpass to become a means of transforming an environmental passive into an economic asset. Technical solutions combined with the objective of reducing both acquisition and operating costs are responsible for breaking down many of these barriers. In regions with several biogas producers close to each other, a pipeline network enables the use of this gas in a single location, reducing costs compared to isolated installations and/or transport by trucks, whether for waste or for the gas itself. Therefore, engineering projects with this purpose should contemplate the dimensioning of the network of pipelines for the transportation of biogas, which has a reverse logic of operation to pipelines networks for transporting natural gas, due to the low pressures in which biogas is obtained. Given this, the present study carried out the dimensioning of the pipeline network of the COPEL R&D project in Entre Rios do Oeste, Brazil, using the premises that involve the biogas chain. The results show that it is possible to reduce piping diameter compared to current methodologies, reducing costs and increasing system reliability.

**Keywords:** Biogas. Energy. Methane.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	7
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	8
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	13
4. CONCLUSÕES .....	17

## 1. INTRODUÇÃO

A consolidação da cadeia de biogás em meios rurais no Brasil depende de métodos inovadores para que o processo se torne viável economicamente, atraindo a atenção de um número maior de produtores rurais, dispostos a participar deste processo que visa a sustentabilidade dentro da cadeia produtiva rural.

Porém não só a parte econômica deve passar por esta inovação, as soluções técnicas têm um papel importantíssimo, pois aliado ao baixo custo, os sistemas de transporte devem atender as demandas para as quais foram projetados.

Neste âmbito, sistemas de transporte de biogás devem cumprir com a entrega da maior vazão de biogás gerada em sistemas de biodigestão até o ponto de consumo, seja ele para conversão em energia térmica, elétrica e/ou veicular. Busca-se, portanto, não só a eficácia do processo, como também a eficiência em relação a perdas produtivas e energéticas.

Para tal, não só os produtores e centros de pesquisa devem ser envolvidos, como também autoridades públicas e indústrias, a fim de fomentar o mercado na busca de soluções, desde o desenvolvimento de equipamentos que supram as necessidades técnicas, como o debate para criação de planos de utilização desta nova tecnologia junto aos procedimentos existentes nos mais variados campos da legislação nacional.

Com este desafio em mãos, os sistemas de transporte de biogás em rede atuais não possuem uma metodologia consolidada para seu dimensionamento, tampouco uma lógica de válvulas e equipamentos bem definida para a efetiva entrega do biogás no ponto final de consumo.

Os sistemas existentes não cumprem este papel de forma otimizada, e por esta razão, parte do biogás não chega ao ponto de consumo, tornando o sistema subdimensionado e a planta ineficiente em termos de geração energética devido a indisponibilidade de gás combustível.

Com isso, este trabalho visa determinar um método de dimensionamento para redes de tubulação de biogás, com base na lógica de funcionamento proposta. Para isso será proposta uma lógica de transporte para redes de tubulações de biogás, com a determinação de um método de dimensionamento com uma planilha eletrônica de cálculos.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

No presente trabalho o sistema de transporte de biogás foi objeto de análise, sendo utilizado como base de comparação o projeto intitulado “PD-06491-0287/2012 – Arranjo Técnico e Comercial de Geração Distribuída de Energia Elétrica a partir do Biogás de Biomassa Residual da Suinocultura em Propriedades Rurais no Município de Entre Rios do Oeste do Paraná/Programa P&D – Copel Geração e Transmissão S.A.”, com implantação já iniciada e prevista conclusão em 2019, o qual transporta o biogás gerado em 17 propriedades rurais por meio de tubulações enterradas (biogásoduto rural) até uma Mini Central Termoelétrica (MCT).

O arranjo deste sistema de transporte possui 20,6 quilômetros de extensão de tubulações em polietileno de alta densidade (PEAD) de pigmentação amarela e conexões de eletrofusão, enterradas conforme traçado demonstrado na Figura 1.



Figura 1 - Traçado do biogásoduto em Entre Rios do Oeste

Fonte: O Autor (2019)



As análises tiveram como objetivo verificar a eficácia do sistema em transportar o biogás de cada propriedade rural até o ponto final de consumo. Além disso, foram propostas melhorias no sistema analisado visando torná-lo viável técnico e economicamente para novos projetos que permitam um arranjo similar, ou seja, por rede de tubulações.

Para isso os critérios de desempenho adotados nestas análises foram a velocidade e a constância de entrega de biogás no local de consumo. Os parâmetros que influenciam no desempenho são principalmente o diâmetro e comprimento da tubulação, vazão, velocidade e pressão do biogás, bem como temperatura e umidade deste fluido.

Desta forma foram utilizadas equações conhecidas de mecânica dos fluidos aplicadas para gases compressíveis, como a Equação 01 para determinar a velocidade de um fluido compressível.

$$v = \frac{Q \cdot P_n}{A \cdot P} \quad (01)$$

Onde,

$v$  = Velocidade do fluido na seção considerada [m/s];

$Q$  = Vazão do fluido na seção considerada [m<sup>3</sup>/s];

$P_n$  = Pressão manométrica na CNTP [Pa];

$P$  = Pressão manométrica do fluido na seção considerada [Pa];

$A$  = Área da seção transversal à direção do escoamento do fluido [m<sup>2</sup>].

E a Equação 02, derivada da equação de Bernoulli, para determinar a perda de carga de um trecho de tubulação conhecido desprezando a diferença de altura entre estes.

$$P_1^2 - P_2^2 = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{D} \cdot \rho \cdot \frac{T}{T_n} \cdot P_n \cdot z \quad (02)$$

Onde,

$P_1$  e  $P_2$  = Pressão manométrica do biogás nos pontos 1 e 2 [Pa];

$f$  = Fator de atrito, definido pela equação de Colebrook-White [adimensional];

$L$  = Comprimento da tubulação do trecho considerado [m];

$v$  = Velocidade do fluido calculado pela equação 01 [m/s];

$D$  = Diâmetro interno da tubulação do trecho considerado [m];

$\rho$  = Densidade do fluido, biogás [kg/m<sup>3</sup>];

$T$  = Temperatura do fluido no trecho considerado [°C];

$T_n$  = Temperatura na CNTP [0 °C];

$P_n$  = Pressão na CNTP [101,325 kPa];

$z$  = Fator de compressibilidade do fluido [adimensional].

Outras equações foram necessárias para resolução da Equação 02, assim, o fator de atrito foi determinado pela Equação 03 de Colebrook-White e o número de Reynolds pela Equação 04.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3,72 \cdot D} + \frac{2,51}{R_e \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (03)$$

Onde,

$f$  = Fator de atrito [adimensional];

$\varepsilon$  = Rugosidade equivalente da tubulação, PEAD PE 100 [ $1 \times 10^{-5}$  m];

$D$  = Diâmetro interno da tubulação do trecho considerado [m];

$R_e$  = Número de Reynolds [adimensional].

$$R_e = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (04)$$

Onde,

$R_e$  = Número de Reynolds [adimensional];

$v$  = Velocidade do fluido calculado pela equação 01 [m/s];

$D$  = Diâmetro interno da tubulação do trecho considerado [m];

$\nu$  = Viscosidade cinemática [m<sup>2</sup>/s].

Todas estas equações foram inseridas numa planilha eletrônica de cálculo (Excel), com o intuito de conferir maior agilidade e confiabilidade no dimensionamento das tubulações. Os parâmetros que foram utilizados são mostrados na Tabela 1 para parâmetros fixos e na Tabela 2 para os parâmetros variáveis.

**Tabela 1 - Parâmetros Fixos**

ITEM	Descrição	Símbolo	Valor	Unidade
1	Rugosidade	$\varepsilon$	1,54E-06 *	m
2	Viscosidade cinemática	$\nu$	1,31E-05 **	m <sup>2</sup> /s
3	Temperatura na CNTP	$T_n$	273,15	K
4	Pressão na CNTP	$P_n$	1,01325E+05	Pa
5	Fator de compressibilidade	$z$	0,994 ***	-

6	MPO gasômetros	MPO <sub>g</sub>	300	Pa
7	MPO tubulação PE100 SDR11	MPO <sub>t</sub>	7,00E+05	Pa

\* PPI (2018) / \*\* ETB (2018) / \*\*\* WEIDENAAR (2014).

Fonte: O Autor (2019)

**Tabela 2 - Parâmetros variáveis**

ITEM	Descrição	Símbolo	Unidade
1	Vazão de biogás	Q	m <sup>3</sup> /h
2	Densidade do biogás	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>
3	Diâmetro da tubulação	D	mm
4	Comprimento da rede	L	m
5	Altura manométrica	H <sub>c</sub>	Pa
6	Pressão da válvula de contrapressão	P	Pa

Fonte: O Autor (2019)

O fator de atrito foi determinado por método numérico (Newton-Raphson) apresentado na equação 03 de colebrook-white para a estimativa inicial, com tolerância de erro de  $1 \times 10^{-9}$ .

Para a realização dos cálculos a rede de tubulações foi subdividida em trechos de tubulação, utilizando como exemplo o traçado da Figura 1, tais trechos se dividem pelas interligações entre a rede principal (linhas amarelas) e seus ramais de derivação (linhas vermelhas), bem como interligações de redes principais com principais (amarelo com amarelo).

Com a vazão determinada em cada trecho, foi preciso conhecer a pressão em uma das extremidades da rede de tubulações. Este valor pode ser conhecido por meio da pressão do gasômetro na central ou como proposto neste trabalho, por meio de uma válvula de contrapressão também instalada na central.

Assim, a pressão no final da rede de tubulações (ou final do trecho 1) foi definida como sendo igual a 2,0 bar ou 200 kPa. Com isso foi calculada a pressão no ponto inicial do trecho 1, e este valor foi igualado à pressão final do trecho 2, possibilitando calcular a pressão inicial do trecho 2, e nesta sequência calculou-se a pressão em todas as interligações da rede principal.

Para o dimensionamento dos ramais de derivação, foi usado o mesmo conceito, porém neste ponto são conhecidas as pressões tanto inicial quanto final, desta forma a incógnita foi determinar a altura manométrica que o compressor deve ser capaz de suprir para que o fluido seja injetado na rede principal, para isso foi utilizada a Equação 05 (Bernoulli) apenas para verificação da capacidade do compressor e velocidade máxima permitida nas tubulações.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + H_c = Z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \sum \frac{f \cdot L \cdot v^2}{D \cdot 2 \cdot g} \quad (05)$$

A interação com a tabela ocorreu através da seleção do diâmetro da tubulação. Quanto maior o diâmetro, menor a velocidade do fluido e menor a pressão inicial do trecho, porém maiores os custos do empreendimento. E quanto menor o diâmetro, maior a velocidade do fluido e maior a pressão inicial do trecho. Ou seja, o método de dimensionamento deve encontrar o ponto ótimo entre estas duas variações, considerando os limites pré-estabelecidos para velocidade e MPO da tubulação.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da obtenção dos dados de produção de biogás de cada propriedade rural (Tabela 3) foi possível determinar a vazão em cada trecho pela soma das vazões dos trechos a montante do trecho considerado (Tabela 4).

**Tabela 3 - Vazão de biogás e comprimento dos ramais nas propriedades**

Nº	Propriedade	Comprimento do ramal (m)	Biogás (m³/dia)	Compressor selecionado (PCM)	Vazão de biogás (m³/h)
1	Propriedade 01	20	148	10	17,0
2	Propriedade 02	25	261	20	34,0
3	Propriedade 03	330	447	40	68,0
4	Propriedade 04	35	744	50	85,0
5	Propriedade 05	180	320	25	42,5
6	Propriedade 06	50	194	15	25,5
7	Propriedade 07	155	223	20	34,0
8	Propriedade 08	50	102	10	17,0
9	Propriedade 09	140	417	40	68,0
10	Propriedade 10	280	327	25	42,5
11	Propriedade 11	205	198	15	25,5
12	Propriedade 12	135	223	20	34,0
13	Propriedade 13	105	223	20	34,0
14	Propriedade 14	120	202	15	25,5
15	Propriedade 15	100	268	20	34,0
16	Propriedade 16	230	240	20	34,0
17	Propriedade 17	120	208	20	34,0

Fonte: O Autor (2019)

**Tabela 4 - Somatório de vazões e comprimentos dos trechos**

Trechos de tubulação		Comprimento do trecho (m)	Vazão (m³/h)
Ponto Inicial	Ponto Final		
2	MCT	200	620,5
1	2	180	17,0
3	2	440	603,5
4	3	1615	450,5
5	4	405	42,5
6	4	1545	408,0
7	6	445	25,5
8	6	1730	382,5
9	8	710	382,5
10	9	1680	348,5
11	10	310	331,5
12	11	385	263,5
14	12	955	221,0
18	14	2270	195,5

19	18	845	161,5
20	19	740	34,0
21	19	895	127,5
22	21	680	102,0
23	22	1670	68,0
24	23	190	34,0

Fonte: O Autor (2019)

Com isso, as pressões e diâmetros resultantes da aplicação das equações e conceitos apresentados são mostrados na Tabela 5 para os ramais de derivação e na Tabela 6 para os trechos da rede principal.

**Tabela 5 - Resultado do dimensionamento das tubulações nos ramais das propriedades**

Nº	Propriedade	Diâmetro (mm)	Velocidade (m/s)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Pressão Inicial (Pa)	Pressão Final (kPa)	Altura manométrica (kPa)
1	Propriedade 01	25	7,9	3,2	150	214,7	217,6
2	Propriedade 02	32	8,4	3,1	150	214,7	217,4
3	Propriedade 03	40	10,8	3,2	150	212,7	257,5
4	Propriedade 04	40	13,5	3,2	150	212,7	219,6
5	Propriedade 05	32	9,0	3,5	150	250,6	276,9
6	Propriedade 06	25	9,1	3,8	150	278,7	290,5
7	Propriedade 07	25	12,8	3,7	150	263,2	328,1
8	Propriedade 08	20	11,0	3,9	150	283,1	307,7
9	Propriedade 09	32	12,0	4,0	150	299,6	338,5
10	Propriedade 10	25	13,5	4,1	150	312,1	457,9
11	Propriedade 11	20	14,0	4,3	150	332,8	507,7
12	Propriedade 12	25	9,2	4,7	150	367,5	407,8
13	Propriedade 13	25	7,7	5,4	150	435,9	462,5
14	Propriedade 14	20	11,5	5,1	150	406,2	490,4
15	Propriedade 15	25	8,2	5,1	150	413,5	440,1
16	Propriedade 16	20	14,7	5,2	150	422,0	679,7
17	Propriedade 17	20	14,4	5,3	150	432,5	563,0

Fonte: O Autor (2019)

**Tabela 6 – Resultado do dimensionamento das tubulações por trecho da rede principal**

Trechos de tubulação		Diâmetro (mm)	Velocidade (m/s)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Pressão Final (kPa)	Pressão Inicial (kPa)
Ponto Inicial	Ponto Final					
2	MCT	110	13,7	2,0	200,0	204,2
1	2	25	8,3	2,1	204,2	214,7
3	2	110	13,1	2,1	204,2	212,7
4	3	110	9,4	2,1	212,7	229,6
5	4	32	9,8	2,3	229,6	250,6
6	4	110	7,9	2,3	229,6	241,5
7	6	25	10,5	2,4	241,5	278,7
8	6	110	7,0	2,4	241,5	252,4

9	8	90	10,0	2,5	252,4	263,2
10	9	90	8,8	2,6	263,2	283,1
11	10	63	15,9	2,8	283,1	299,6
12	11	63	11,9	3,0	299,6	312,1
14	12	63	9,6	3,1	312,1	332,8
18	14	63	8,0	3,3	332,8	367,5
19	18	50	9,5	3,7	367,5	391,2
20	19	25	8,6	3,9	391,2	435,9
21	19	50	7,0	3,9	391,2	406,2
22	21	50	5,4	4,1	406,2	413,5
23	22	50	3,5	4,1	413,5	422,0
24	23	25	8,0	4,2	422,0	432,5

Fonte: O Autor (2019)

Para uma melhor visualização geográfica, os resultados também são apresentados na Figura 2 chamada de mapa técnico, que integra a Figura 1 e as Tabelas 3, 4, 5 e 6 num único documento.

Através dos resultados verifica-se que a vazão de chegada na MCT de 620,5 m<sup>3</sup>/h, mostrada na Tabela 4, representa a condição quando todas as propriedades estão enviando biogás ao mesmo tempo para a rede coletora de biogás, ou seja, esta condição é a que representa o maior nível de solicitação dos materiais e equipamentos da rede de tubulações, ou biogasoduto.

As velocidades do fluido em cada trecho não ultrapassaram o limite de 20 m/s, mantendo assim uma condição ótima de trabalho em relação à abrasão por particulados no interior das tubulações, o que corrobora para uma maior longevidade do sistema de transporte.

A altura manométrica que o compressor deve suprir em cada propriedade não ultrapassa o valor de 8,0 bar, que é a pressão máxima de trabalho para compressores de pistão, os mais indicados para este tipo de trabalho.

A pressão necessária para envio do biogás aumenta conforme a distância do trecho em relação ao ponto final de entrega, a MCT, isso se deve principalmente pela perda de carga por atrito devido à rugosidade da tubulação. Este aumento de pressão impacta diretamente na densidade do biogás.

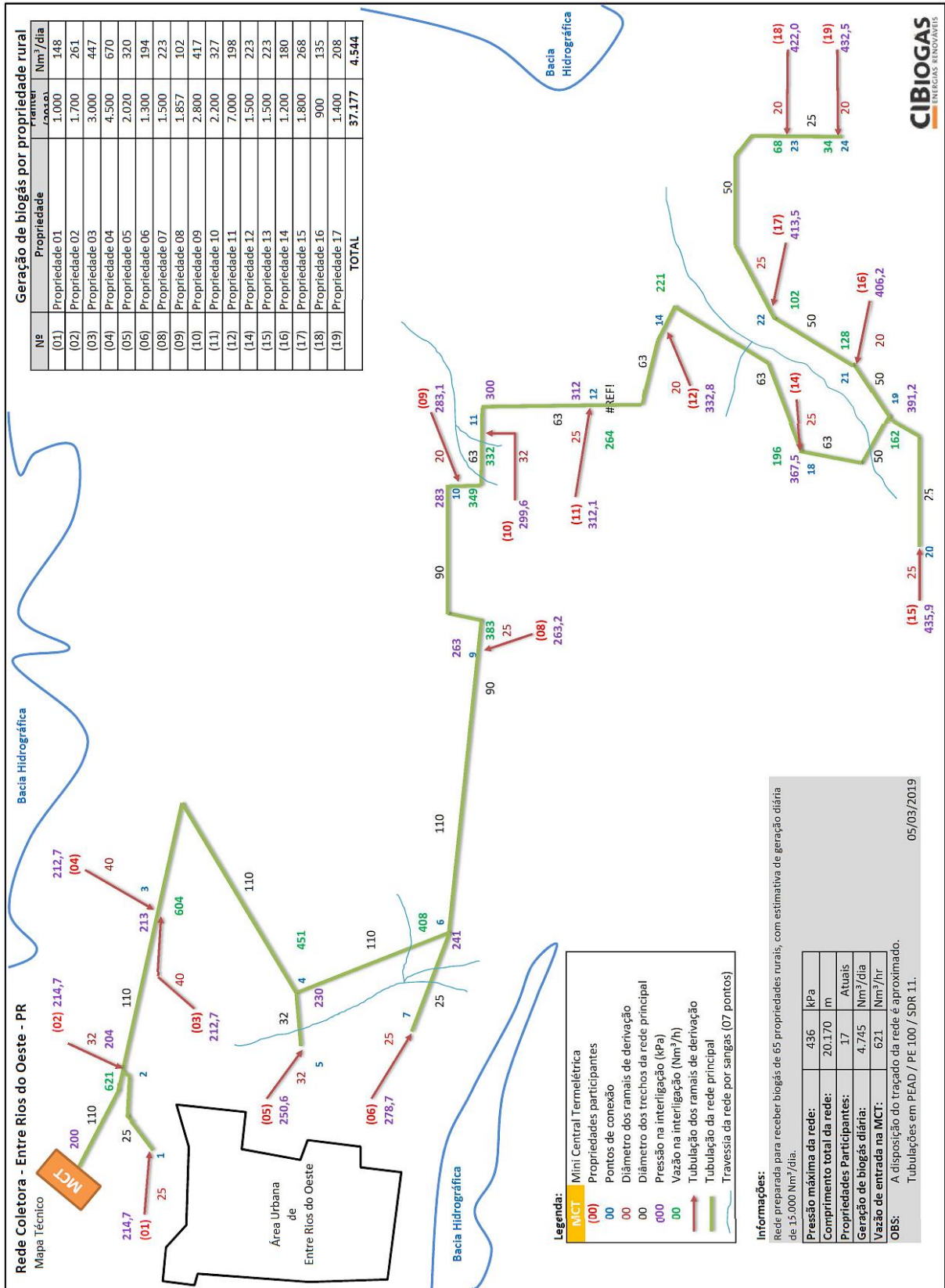


Figura 2 - Mapa técnico do biogasoduto

Fonte: O autor (2019)



#### 4. CONCLUSÕES

Tanto conceito quanto metodologia apresentadas neste artigo não podem ser aplicadas para dimensionamento de tubulações de gás natural, pois a lógica de envio é inversa devido às altas pressões em que este é obtido, bem como o envio ser de um único ponto para a entrega em diversos locais.

No caso do biogás onde a obtenção se dá em baixa pressão, e o envio através de diversos pontos distintos para um único local de consumo, se faz necessário uma análise diferenciada, justamente a que foi abordada neste documento.

Conforme discussão sobre os resultados apresentados e juntamente à planilha de cálculo, é possível selecionar diferentes diâmetros observando sua influência direta em todo os demais trechos do sistema, facilitando tomadas de decisão pelo projetista e engenheiro em relação aos demais aspectos do projeto.

Aplicando a metodologia deste estudo é possível reduzir custos de implantação e aumentar a confiabilidade do sistema, quando comparado com os métodos utilizados atualmente que ou superdimensionam as tubulações para garantia no atendimento da demanda de biogás, ou subdimensionam pois não cruzam as informações de pressão e comprimento de rede.

Desta forma conclui-se que todos os parâmetros para iniciar o projeto de uma rede coletora de biogás estão definidos, consolidando uma metodologia de cálculo para projetos com este tipo de arranjo.

## REFERÊNCIAS

ETB, Engineering ToolBox, (2018). **Methane - Dynamic and Kinematic Viscosity**. [online] Disponível em: [https://www.engineeringtoolbox.com/methane-dynamic-kinematic-viscosity-temperature-pressure-d\\_2068.html](https://www.engineeringtoolbox.com/methane-dynamic-kinematic-viscosity-temperature-pressure-d_2068.html) [Acesso em 05/03/19].

PPI, Plastics Pipe Institute, (2018). **Handbook of PE Pipe**. [online] Disponível em: <https://plasticpipe.org/publications/pe-handbook.html> [Acesso em 05/03/19].

WEIDENAAR, Taede. **Designing the biomethane supply chain through automated synthesis**. Enschede, Netherlands: Ipskamp Drukkers, 2014.