

Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Dimensionamento econômico para sistemas de irrigação pivô central telescópico:  
estudos de cenários para diferentes regiões do Brasil

**Isabela Alvarenga Almeida**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia  
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba  
2019

Isabela Alvarenga Almeida  
Engenheira Agrícola

Dimensionamento econômico para sistemas de irrigação pivô central telescópico:  
estudos de cenários para diferentes regiões do Brasil  
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:  
Prof. Dr. **RUBENS DUARTE COELHO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia  
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba  
2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Almeida, Isabela Alvarenga

Dimensionamento econômico para sistemas de irrigação pivô central telescópico: estudos de cenários para diferentes regiões do Brasil / Isabela Alvarenga Almeida. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2019.

92 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Dimensionamento econômico 2. Pivô central 3. Irrigação 4. Custo-benefício I. Título

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os que contribuíram para a realização deste trabalho, em especial:

A Deus, pela força, saúde e oportunidades oferecidas em cada etapa da vida.

Ao meu namorado Adriano, pelo companheirismo nos momentos difíceis, compreensão, ajuda em toda a vida e amor.

A minha família, em especial a minha mãe Cibele, ao meu irmão Rafael, ao meu sobrinho Pedro e aos meus avós Dilza e Bgair pelo amor e apoio incondicional.

Ao meu orientador Dr. Rubens Duarte Coelho pela confiança, paciência, orientação e instrução durante o trabalho.

Aos professores Alberto Colombo, José Antônio Frizzone e Sérgio Nascimento Duarte pela disponibilidade em participação da banca de qualificação e contribuições para realização do trabalho.

À Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', responsável pela minha pós-graduação, crescimento profissional e pessoal.

Ao CNPq pelo incentivo financeiro concedido.

Aos meus colegas da Esalq que deram todo apoio nos momentos difíceis e ajuda nos períodos de desespero, Ailson Maciel, Ana Sátiro, Diego Sousa, Nathália Lopes e Thimóteo Barros, em especial ao Alex Almeida e Jefferson Oliveira pelas contribuições realizadas.

Aos colegas de trabalho da Aegro pelo apoio e compreensão.

Ao professor Victor Buono por todas as considerações feitas.

A todos os professores e colegas do departamento, e a todos que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

MUITO OBRIGADA!

## SUMÁRIO

RESUMO .....	5
ABSTRACT .....	6
LISTA DE FIGURAS .....	7
LISTA DE TABELAS .....	10
1. INTRODUÇÃO .....	13
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	15
2.1. Irrigação no Brasil.....	15
2.2. Sistemas de Irrigação por Pivô Central .....	16
2.3. Pivô Central no Brasil .....	18
2.4. Estrutura Tarifária da Energia Elétrica .....	19
2.5. Custos de Energia Elétrica para Irrigação .....	22
2.6. Dimensionamento Econômico .....	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	25
3.1. Localização e Caracterização dos Locais em Estudo .....	25
3.2. Determinação da Lâmina de Água Aplicada .....	25
3.2.1 Variáveis Meteorológicas - Composição das Séries Históricas .....	26
3.2.3 Cálculo da ETo e Análise de Probabilidade .....	26
3.2.4 Análise do Somatório Mensal para cálculo da jornada de trabalho.....	27
3.3. Configurações da linha lateral .....	28
3.4 Hidráulica da Linha Lateral.....	34
3.5 Sistema de bombeamento.....	36
3.6 Análise Energética.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	41
REFERÊNCIAS.....	79
ANEXOS .....	81

## RESUMO

### Dimensionamento econômico para sistemas de irrigação pivô central telescópico: estudos de cenários para diferentes regiões do Brasil

O pivô central está entre um dos sistemas de irrigação mais populares utilizados na agricultura irrigada em geral. Em 2018, estudos mostraram uma área de 6.023.087 hectares irrigados no Brasil por diferentes métodos de irrigação, um aumento de 3,45% da área em relação ao ano de 2017, espera-se 10,09 milhões de hectares até 2030. No dimensionamento econômico do equipamento pivô central aconselha-se um estudo que viabilize o melhor diâmetro da tubulação em contrapartida à escolha do conjunto motobomba, diminuindo assim os investimentos em execução e manutenção do equipamento. O trabalho teve como objetivo a determinação do design econômico, fornecendo uma melhor relação custo-benefício de um pivô central dimensionado para três diferentes regiões do país: Unaí (MG), Luís Eduardo Magalhães (BA) e Cristalina (GO), para quatro diferentes tamanhos de áreas irrigadas. A vazão do equipamento foi calculada de acordo com a ETo de cada uma das regiões para as probabilidades de ocorrência em 50 e 80% da demanda atmosférica. O pivô central mais econômico foi determinado por diferentes combinações entre diâmetros e comprimentos de tubulação da linha lateral e o consumo energético segundo às diferentes tarifas energéticas e descontos por região. As combinações com vãos de diâmetros menores apresentam um menor custo fixo, mas conseqüentemente um maior custo operacional e vice-versa. Os resultados com os cálculos realizados para áreas irrigadas de 50 ha, mostraram para 67% das simulações, mais acessível o equipamento com diâmetro único 6 <sup>5/8</sup>'' (PC1), o qual apresentou-se como a opção mais cara em 100% das áreas de 125 ha. Para a área irrigada de 80 ha a combinação PC23 foi considerada como a opção mais barata, a qual apresentou 63% da linha lateral com diâmetro 6 <sup>5/8</sup>'' . Para as áreas de 100 e 125 ha, as combinações mais acessíveis foram referentes a tubulação da linha lateral com 76 e 86,7% com o diâmetro 8 <sup>5/8</sup>'' , PC26 e PC 17, respectivamente. Recomenda-se uma análise do peso da tubulação da linha lateral (pressão do rodado sobre o solo) caso as opções apresentem custo total semelhante entre as opções de diâmetros analisados.

Palavras-chave: Aspersão, Sistemas mecanizados, Hidráulica, Custo benefício

## ABSTRACT

**Economic scaling for irrigation systems telescopic central pivot: scenarios studies for different regions of Brazil**

The central pivot is among the most popular irrigation systems used in irrigated agriculture in general. In 2018, studies showed an area of 6,023,087 hectares irrigated in Brazil by different irrigation methods, an increase of 3.45% in the area compared to 2017, and 10.09 million hectares are expected by 2030. In the economic sizing of the central pivot equipment, a study is recommended to enable the best pipe diameter in return for the choice of the motor pump set, thus reducing investments in equipment execution and maintenance. The work aimed to determine the economic design, providing a better cost-benefit ratio of a central pivot sized for three different regions of the country: Unaí (MG), Luís Eduardo Magalhães (BA) and Cristalina (GO), for four different sizes of irrigated areas. The flow of the equipment was calculated according to the ETo of each of the regions for the probabilities of occurrence in 50 and 80% of the atmospheric demand. The most economical central pivot was determined by different combinations of diameters and pipe lengths of the lateral line and energy consumption according to the different energy tariffs and discounts per region. The combinations with smaller diameter spans present a lower fixed cost, but consequently a higher operational cost and vice versa. The results with the calculations performed for irrigated areas of 50 ha showed that for 67% of the simulations, the equipment with a single diameter of 6 5/8" (PC1) was more accessible, which was presented as the most expensive option in 100% of the areas of 125 ha. For the irrigated area of 80 ha the combination PC23 was considered the cheapest option, which presented 63% of the lateral line with diameter 6 5/8". For the areas of 100 and 125 ha, the most accessible combinations were for 76 and 86.7% sideline piping with 8 5/8" diameter, PC26 and PC 17, respectively. It is recommended to analyze the weight of the lateral line piping (pressure of the wheels on the ground) if the options present similar total cost among the options of diameters analyzed.

Keywords: Sprinkling, Mechanized systems, Hydraulics, Cost benefit

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Variação dos custos operacionais (CO), de investimento (CI) e total (CT) de um sistema de bombeamento em função do diâmetro da tubulação (CARVALHO & OLIVEIRA, 2008).....	24
Figura 2 - Gráfico das demarcações dos meses com PPT inferior a 100 mm referentes às cidades em estudo ...	28
Figura 3- Modelo da tubulação da linha lateral do sistema de irrigação dimensionado para um diâmetro único. ....	33
Figura 4- Modelo da tubulação da linha lateral do sistema de irrigação dimensionado apresentando três combinações de diâmetros (tubulação telescópica) .....	33
Figura 5 - Valor do fator de correção da perda de carga em pivô central para frações diferentes do comprimento do raio irrigado e dois diferentes valores do expoente $ev$ . ....	35
Figura 6- Esquema da seção $s$ sobre a linha lateral com distâncias $R$ e $RL$ do ponto do pivô. Representando: $R$ : raio efetivo irrigado, com $R \geq RL$ (m); $Rs$ : distância do ponto do pivô à seção $s$ ( $m^3h^{-1}$ ); e $RL$ : comprimento físico da lateral (m). Fonte: Elaborada pela autora com base em dados de Frizzone, 2018. ....	35
Figura 7- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 50 ha para as vazões de 106 e 131 $m^3h^{-1}$ , para o município de Unai. ....	42
Figura 8- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 80 ha para as vazões de 170 e 209 $m^3h^{-1}$ , para o município de Unai. ....	42
Figura 9- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 100 ha para as vazões de 212 e 261 $m^3h^{-1}$ , para o município de Unai. ....	43
Figura 10- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 125 ha para as vazões de 265 e 326 $m^3h^{-1}$ , para o município de Unai. ....	43
Figura 11- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 50 ha para as vazões de 127 e 143 $m^3h^{-1}$ , para o município de Luis Eduardo Magalhães. ....	44
Figura 12- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 80 ha para as vazões 204 e 229 $m^3h^{-1}$ , para o município de Luis Eduardo Magalhães. ....	44
Figura 13- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 100 ha para as vazões 254 e 286 $m^3h^{-1}$ , para o município de Luis Eduardo Magalhães. ....	45
Figura 14- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 125 ha para as vazões 318 e 357 $m^3h^{-1}$ , para o município de Luis Eduardo Magalhães. ....	45
Figura 15- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 50 ha para as vazões 123 e 138 $m^3h^{-1}$ , para o município de Cristalina.....	46
Figura 16- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 80 ha para as vazões 197 e 221 $m^3h^{-1}$ , para o município de Cristalina.....	46
Figura 17- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 100 ha para as vazões 246 e 276 $m^3h^{-1}$ , para o município de Cristalina.....	47
Figura 18- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 125 ha para as vazões 308 e 345 $m^3h^{-1}$ , para o município de Cristalina.....	47

Figura 19- Custo do equipamento pivô central por hectare, áreas irrigadas com 125 ha, 100, 80 e 50 ha. ....	53
Figura 20- Relação das cores relacionadas com o diâmetro para facilitar o entendimento dos gráficos abaixo. .	58
Figura 21- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 50 hectares com $106\text{m}^3\text{h}^{-1}$ de vazão para o município de Unaí. ....	58
Figura 22- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 50 hectares com $131\text{m}^3\text{h}^{-1}$ de vazão para o município de Unaí. ....	59
Figura 23- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 80 hectares com $170\text{m}^3\text{h}^{-1}$ de vazão para o município de Unaí. ....	60
Figura 24- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 80 hectares com $209\text{m}^3\text{h}^{-1}$ de vazão para o município de Unaí. ....	60
Figura 25- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 100 hectares com $212\text{m}^3\text{h}^{-1}$ de vazão para o município de Unaí. ....	61
Figura 26- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 100 hectares com $261\text{m}^3\text{h}^{-1}$ de vazão para o município de Unaí. ....	61
Figura 27- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 125 hectares com $265\text{m}^3\text{h}^{-1}$ de vazão para o município de Unaí. ....	62
Figura 28- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 125 hectares com $326\text{m}^3\text{h}^{-1}$ de vazão para o município de Unaí. ....	62
Figura 29- Relação dos custos fixos anuais e do custo operacional para a área irrigada de 125 ha e $265\text{m}^3\text{h}^{-1}$ de vazão para o município de Unaí.....	63
Figura 30- Relação dos custos fixos anuais e do custo operacional para a área irrigada de 125 ha e $326\text{m}^3\text{h}^{-1}$ de vazão para o município de Unaí.....	64
Figura 31- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 50 hectares com $127\text{m}^3\text{h}^{-1}$ de vazão para o município de Luis Eduardo Magalhães.....	65
Figura 32- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 50 hectares com $143\text{m}^3\text{h}$ para o município de Luis Eduardo Magalhães.....	65
Figura 33- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 80 hectares com $204\text{m}^3\text{h}^{-1}$ de vazão para o município de Luis Eduardo Magalhães.....	66
Figura 34- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 80 hectares com $229\text{m}^3\text{h}^{-1}$ de vazão para o município de Luis Eduardo Magalhães.....	66
Figura 35- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 100 hectares com $254\text{m}^3\text{h}^{-1}$ de vazão para o município de Luis Eduardo Magalhães.....	67
Figura 36- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 100 hectares com $286\text{m}^3\text{h}^{-1}$ de vazão para o município de Luis Eduardo Magalhães.....	67
Figura 37- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 125 hectares com $318\text{m}^3\text{h}^{-1}$ de vazão para o município de Luis Eduardo Magalhães.....	68
Figura 38- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 125 hectares com $357\text{m}^3\text{h}^{-1}$ de vazão para o município de Luis Eduardo Magalhães.....	68

Figura 39- Relação do custo total com o porcentagem dos custos operacional e fixo para a área irrigada de 125 ha e 318 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de vazão para o município de Luis Educarado Magalhães. ....	69
Figura 40- Relação do custo total com o porcentagem dos custos operacional e fixo para a área irrigada de 125 ha e 357 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de vazão para o município de Luis Eduardo Magalhães. ....	69
Figura 41- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 50 hectares com 123 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de vazão para o município de Cristalina. ....	70
Figura 42- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 50 hectares com 138 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de vazão para o município de Cristalina. ....	71
Figura 43- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 80 hectares com 197 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de vazão para o município de Cristalina. ....	71
Figura 44- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 80 hectares com 221 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de vazão para o município de Cristalina. ....	72
Figura 45- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 100 hectares com 246 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de vazão para o município de Cristalina. ....	72
Figura 46- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 100 hectares com 276 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de vazão para o município de Cristalina. ....	73
Figura 47- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 125 hectares com 308 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de vazão para o município de Cristalina. ....	73
Figura 48- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 125 hectares com 345 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de vazão para o município de Cristalina. ....	74
Figura 49- Relação do custo total com o porcentagem dos custos operacional e fixo para a área irrigada de 125 ha e 308 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de vazão para o município de Cristalina. ....	75
Figura 50 Relação do custo total com o porcentagem dos custos operacional e fixo para a área irrigada de 125 ha e 345 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> de vazão para o município de Cristalina. ....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Municípios com áreas equipadas por pivôs centrais acima de cinco mil hectares. ....	18
Tabela 2- Períodos do dia e classificação de horários. ....	20
Tabela 3- Porcentagem de desconto especial para irrigantes de acordo com as diferentes regiões do País. ....	22
Tabela 4- Coordenadas geográficas, altitude, clima e solo predominante em Unaí, Luís Eduardo Magalhães e Cristalina. ....	25
Tabela 5- Eto para os níveis de demanda atmosférica a 50 e 80% respectivamente, para os municípios em estudo. ....	27
Tabela 6- Média dos meses com precipitação abaixo de 100 mm e quantidade de dias de irrigação ao ano para os municípios de Unaí, Cristalina e Luís Eduardo Magalhães. ....	28
Tabela 7- Custo por metro linear para diferentes diâmetros de tubulação. ....	33
Tabela 8- Tarifação de energia elétrica para as regiões em estudo. ....	38
Tabela 9- Dados de área irrigada, evapotranspiração e vazão para o município de Unaí. ....	41
Tabela 10- Dados de área irrigada, evapotranspiração e vazão para o município de Luis Eduardo Magalhães. ....	41
Tabela 11- Dados de área irrigada, evapotranspiração e vazão para o município de Cristalina. ....	41
Tabela 12- Custo fixo do pivô (R\$) para as diferentes combinações de tubulação referente à área de 125ha. ....	49
Tabela 13- Custo fixo do pivô (R\$) para as diferentes combinações de tubulação referente à área de 100ha. ....	50
Tabela 14- Custo fixo do pivô (R\$) para as diferentes combinações de tubulação referente à área de 80ha. ....	51
Tabela 15- Custo fixo do pivô (R\$) para as diferentes combinações de tubulação referente à área de 50ha. ....	52
Tabela 16- Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 50 ha em Unaí. ....	54
Tabela 17 - Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 80 ha em Unaí. ....	55
Tabela 18- Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 100 ha em Unaí. ....	56
Tabela 19- Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 125 ha em Unaí. ....	57
Tabela 20 - Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 50 ha em Luís Eduardo Magalhães. ....	85
Tabela 21 - Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 80 ha em Luís Eduardo Magalhães. ....	86
Tabela 22 - Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 100 ha em Luís Eduardo Magalhães. ....	87
Tabela 23 - Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 125 ha em Luís Eduardo Magalhães. ....	88
Tabela 24 - Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 50 ha em Cristalina. ....	89

Tabela 25 - Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 80 ha em Cristalina.....	90
Tabela 26- Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 100 ha em Cristalina.....	91
Tabela 27- Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 125 ha em Cristalina.....	92



## 1. INTRODUÇÃO

O uso eficaz e consciente da água na agricultura irrigada e conseqüentemente energia, é de responsabilidade da sociedade, devido às restrições ambientais impostas com a tendência de redução da disponibilidade hídrica nas microbacias de interesse agrícola e ao aumento dos custos de energia, fazendo-se necessário o uso de simulações e análises de consumo para o planejamento de estratégias e políticas de seu uso.

Atualmente, com o amplo desenvolvimento de equipamentos para irrigação associados ao aumento do interesse pelos empresários rurais, têm sido atingidos avanços significativos com a técnica de irrigação, tanto no que se refere à modernização de equipamentos e componentes quanto nas metodologias para dimensionamentos e planejamentos de sistemas (FRIZZONE, 2018).

Aproximadamente 260 milhões de hectares no mundo são irrigados por diversos métodos de irrigação. Segundo dados da ABIMAQ (2018) no acumulado de 2000 a 2018, o total de área irrigada no Brasil foi de 6.023.087 contra 5.822.337 hectares irrigados no ano de 2017, um crescimento de 3,45%. Com estes resultados, dados da ANA (2018) apontaram que no ano de 2017 o Brasil estava entre os 10 países com maior área irrigada do planeta, sendo que este número representa apenas 20% da área potencial para a atividade.

A agricultura irrigada por pivôs centrais apresentou alto crescimento nas últimas décadas, e que se acelerou ainda mais a partir de 2010. Em 1985 foram identificados 363 pivôs centrais (pontos) irrigando uma área de 31 mil hectares. Em 2000 foram 490,5 mil hectares equipados para irrigação em 6.680 pontos. Em 2017 a área triplicou para 1 milhão e 476 mil hectares em 23.181 pontos. A área atual é 47 vezes maior do que a área mapeada em 1985 (ANA, 2019).

O sistema consiste em uma tubulação principal aérea, girando em torno de uma base no centro do campo (ponto do pivô), de modo que a seção irrigada receba a forma circular, incluindo raios de giro inferiores a 360°, podendo também irrigar 80 a 90% de uma área quadrada. Os pivôs operam em terrenos variáveis, com declives de até 30% com projeto adequado, embora recomenda-se um limite superior de 15% de inclinação (ALAZBA, A. A, 2011).

A energia elétrica consumida em sistemas de irrigação pivô central está relacionada ao bombeamento e ao acionamento dos motores elétricos instalados nas torres do sistema, encarregados pelo deslocamento do equipamento sobre a área irrigada. A energia elétrica consumida no bombeamento depende principalmente dos rendimentos da bomba e do motor elétrico, o custo do consumo de energia depende do tempo de funcionamento do sistema de irrigação, da tarifa praticada pelas concessionárias de energia elétrica e pelo período de funcionamento do sistema, além das condições de funcionamento do equipamento, climáticas e manejo da irrigação (MEDEIROS, 2010).

O custo com energia é uma dos fatores mais importantes na agricultura irrigada, especialmente em épocas de crise energética e com constantes reajustes tarifários (BOYER et al., 2014; BARBOSA et al, 2018).

Aparentemente o sistema de irrigação do tipo pivô central são tão completos e automáticos que podem significar pouca complexidade ao projetista, o que não é uma verdade. Para otimizar o funcionamento do sistema, deve-se considerar uma seleção adequada dos seus componentes, um projeto hidráulico e um manejo eficiente (FRIZZONE, 2018).

No dimensionamento econômico de um sistema de irrigação, o objetivo é determinar a configuração do sistema hidráulico que minimize os custos de implantação e operacional, levando-se em consideração às diretrizes da hidráulica (diâmetros x comprimentos de tubulações). Na análise econômica o dimensionamento da tubulação é determinado considerando, a perda de carga, a vazão e a velocidade de escoamento, bem como, o consumo de energia operacional e os custos de investimento, procurando sempre a adoção de uma combinação de diâmetros que proporcione o menor custo total (PEREIRA et al., 2015; SILVA et al. 2015; GEISENHOFF et al., 2018).

Fundamentando-se na hipótese que existe um ponto ótimo entre o dimensionamento da linha lateral telescópica (múltiplos diâmetros) e o consumo energético do sistema de irrigação pivô central para diferentes cenários de exploração agrícola em território nacional, o presente trabalho tem como objetivo a determinação do dimensionamento econômico de linhas laterais telescópicas de acordo com o consumo energético para diferentes áreas irrigadas e regiões do Brasil.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Irrigação no Brasil

Considerado como “*Sistema de Produção de Alimentos mais Eficiente*”, o estímulo ao uso da irrigação surge da indispensabilidade de incremento na produção agrícola, da viabilidade da obtenção de maior produtividade em solos irrigados, tendo em vista que a produtividade da área irrigada é maior que a de sequeiro e do menor risco climático de veranicos durante a estação de crescimento. A irrigação tem obtido bons resultados não só para o atendimento ao incremento na demanda por alimentos como também para reduzir o impacto referente ao uso extensivo de terras na produção agrícola. A perspectiva é de que até 2030, 60% dos alimentos de origem vegetal no mundo, sejam fornecidos pela agricultura irrigada (TALAMINI & OLIVEIRA, 2008).

Conforme análise realizada por Cunha et al. (2015), o custo da terra agrícola em solos irrigados em relação aos solos na agricultura de sequeiro tenderia a ser mais estável. Estudos mostraram que, a um curto espaço de tempo, a expectativa de aumento do valor da terra fazendo uso de irrigação estaria em torno de 3,8% em um cenário mais ameno de mudança climática, em contraste com a redução no custo das terras sob agricultura de sequeiro na ordem de 6,7%. Desta forma, o emprego da tecnologia de irrigação se mostra uma eficaz estratégia de adaptação e mitigação às mudanças climáticas, reduzindo o risco econômico dos produtores rurais.

De acordo com dados da FAO (2015) estima-se que a população brasileira nos próximos 10 anos sofrerá um acréscimo em 40%, podendo alcançar nove milhões de habitantes. Fato que solicitará um aumento de 60% na produtividade pela redução da área agricultável/habitante até 2050. Diante do fato, o Brasil precisa se tornar um dos principais produtores de alimento do mundo em um pequeno intervalo de tempo. Para aumento da produtividade das lavouras, produtores necessitam de aprimoramento na melhoria de processos, tanto em termos tecnológicos (sistemas inteligentes), como no manejo adequado em culturas e solos (ARTIOLI & BELONI, 2016).

Devido a dificuldades de agricultores irrigantes em manejar adequadamente um sistema de irrigação, sem que haja perdas econômicas durante períodos de tentativas e erros na área irrigada, foi desenvolvido em Piracicaba a ideia de conexão real com agricultores irrigantes por meio de aplicativos iOS e Android, para auxiliá-los no manejo da irrigação com base na agilidade operacional oferecida pela telefonia. Os algoritmos calculam em tempo real os valores de Kc referenciados nos sensores do solo e retroalimentam automaticamente o Sistema de manejo da irrigação pelo balanço hídrico. Além da possibilidade de balanço hídrico via sensoriamento remoto, sem a necessidade de instalações de estações meteorológicas em campo (COELHO, 2019).

Aproximadamente 260 milhões de hectares no mundo são irrigados por diversos métodos de irrigação. Segundo dados da ABIMAQ (2018) no acumulado de 2000 a 2018, o total de área irrigada no Brasil foi de 6.023.087 contra 5.822.337 hectares irrigados no ano de 2017, um crescimento de 3,45%. Em 2018 o incremento de área irrigada foi de 200.750 mil hectares, sendo 92 mil do sistema de irrigação do tipo pivô

central, contra 94 mil do ano anterior; 13.750 de área para irrigação por aspersão com carretel, no ano de 2017 foram 14 mil; 31 mil de irrigação por aspersão convencional, fixa, tubo PVC ou canhão, o mesmo número do ano passado; e de 64 mil hectares de irrigação localizada por microaspersão e gotejamento, mantendo o mesmo resultado do ano antecedente.

Segundo dados da ANA (2017) embora todas as regiões do Brasil tenham ampliado suas áreas irrigadas nos últimos anos, nota-se que os aumentos são mais expressivos em regiões como São Paulo, Minas Gerais, Tocantins, Bahia, e recentemente Rio Grande do Sul e Goiás, apresentando as seguintes áreas irrigadas no ano de 2015, respectivamente: 1,3 Mha irrigados, 1,08 Mha, 127.804 mil ha, 504.781, 1,36 Mha e 717.485 mil hectares irrigados.

O Brasil apresenta um potencial de expansão de áreas adicionais irrigáveis físicas totais de 76,2 Mha; sendo o indicador de potencial efetivo, o qual considera somente áreas de maior aptidão física e existência de condições técnicas favoráveis, escoamento da produção e energia elétrica em 11,2 Mha. Estima-se que até 2030 serão adicionados 3,14 Mha, uma média de 200 mil hectares ao ano, aumento correspondente a um aumento de 45% sobre a área atual e ao aproveitamento de 28% do potencial efetivo estimado. (ANA, 2019).

De acordo com estudos divulgados pela Câmara Setorial de equipamentos de irrigação da Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos (Abimaq), a área irrigada no Brasil em 2018 obteve uma alta de 49% em relação a 2000, um incremento de aproximadamente 3 milhões de hectares (ABIMAQ, 2018).

## 2.2. Sistemas de Irrigação por Pivô Central

Em 1948, Frank L. Zybach idealizou e implementou em campo pela primeira vez o Pivô Central (irrigação de pastagem); em 1949 apresentou o grande invento para análise, o qual em 1952 no Colorado (EUA) foi patenteado. A princípio era uma simple máquina movida hidráulicamente e acionada por mecanismos de pistões. Produzindo unidades até 1954, seu inventor vendeu os direitos de fabricação para a empresa Americana (Valmont), no estado de Nebraska. A partir de 1968, diversas empresas iniciaram a fabricação destes e na atualidade disputam o mercado mundial. Popularizado em todo o mundo, o pivô central é o sistema de irrigação de maior aceitação em larga escala (PAIR et al., 1983).

O sistema consiste em uma lateral móvel com vários bocais de distribuição de água, divididos em aspersores de impacto (rotativos) ou “sprays” (fixos ou rotativos), instalados na maioria das vezes em espaçamentos regulares. Esta, é suportada longitudinalmente por diversas torres, que movimentam sobre rodas ao redor do ponto do pivô. Os vãos (tubulações entre as torres) são suportados por uma estrutura metálica em treliças e tirantes, estrutura responsável pela manutenção dos tubos com os emissores a uma determinada altura do solo. Com articulações flexíveis são feitas as ligações entre os vãos, tornando o equipamento capaz de operar em topografias irregulares (RODRIGUES, 1999).

Para melhorar a qualidade de aplicação da água, foram desenvolvidos diferentes tipos de emissores, como difusores fixos, rotativos, emissores que operam a baixa pressão, como 40 kPa, e aplicam água em sulcos contruídos na camada superficial do solo denominados como *Low Energy Precision Application* (LEPA), o qual começou a ser disseminado no Brasil por volta de 1997, no estado da Bahia, iniciando como uma adaptação do

produto original. Para solos em que a capacidade de infiltração e/ou armazenamento superficial são altos existem kits de bocais de baixa pressão e para terrenos com topografias irregulares e acidentadas, mecanismos para controlar a vazão e pressão destes emissores (FRIZZONE, 2019).

Segundo Queiroz (2007), na parte inferior de cada torre existe um motor elétrico de baixa potência conectado a uma caixa redutora com eixos cardan e na parte superior, existe uma caixa de controle elétrico do motor. Através de um dispositivo mecânico acoplado à torre é realizado o acionamento do motor, o qual mede o desalinhamento de cada vão. A velocidade de giro do Pivô Central é controlada por sua última torre, na forma de porcentagem de controle, com um percentímetro localizado no centro do pivô.

O deslocamento da linha lateral é controlado pela movimentação da última torre. Admitindo-se a princípio que todas as torres estejam alinhadas e somente a última se movimenta, o acionamento da torre subsequente se realiza quando o vão em movimento estabelece uma angulação em relação aos demais vãos. Este processo repete-se entre todos os vãos adjacentes, assim ocasionando a movimentação de toda a linha de irrigação pelo intermitente funcionamento dos motores das torres (QUEIROZ, 2007).

O sistema de irrigação tem proporcionado a melhoria da eficiência de irrigação em muitas áreas onde os sistemas por superfície ou aspersão convencional não são bem adaptados. Por serem sistemas de manejo relativamente fácil, também têm permitido um crescimento em novos horizontes para o aumento da produção e produtividade (FRIZZONE, 2019).

Segundo Martin et al. 2007, a grande aceitação deste sistema deve-se a vários fatores: o equipamento requer um mínimo de mão de obra, por ser um equipamento automatizado, podendo muitas ser controlado remotamente; Permite a aplicação de pequenas lâminas com alta frequência para atender às necessidades das culturas sem a lixiviação de nutrientes; Permite a aplicação de água com alta uniformidade; Apresenta facilidade para projeto e instalação comparado a sistemas de microirrigação; Obtenção de elevada eficiência de aplicação, principalmente quando são utilizados os emissores LEPA e os de baixa deriva e operação; Custo de investimento por unidade de área é aproximadamente 60% do custo de um sistema permanente de aspersão ou microirrigação. Em contrapartida o pivô central apresenta algumas desvantagens: a taxa de aplicação de água na extremidade final da linha lateral pode ser elevada, o que pode causar escoamento; Exige área livre de edificações, árvores ou qualquer grande obstáculo; Tem a uniformidade de distribuição afetada pelo vento, dependendo das condições atmosféricas e operacionais estas perdas podem chegar a 25%; Como apresenta deslocamento circular, irriga 80% de uma área quadrada, necessitando de um equipamento especial para irrigar os cantos da área, adicionando complexidade e custos consideráveis ao sistema, além do que áreas menores que 50 hectares podem não apresentar boa economicidade.

Devido a necessidade de uso eficiente da água na agricultura, aprimoramentos e desenvolvimentos de equipamentos de irrigação são sempre necessários. Pensando na versatilidade do pivô central (irrigação por aspersão) e na eficiência do uso da água por gotejamento (irrigação localizada) a implantação do 'Sistema de Irrigação por Gotejamento Móvel (IRGMO)' viabiliza o acoplamento do gotejamento de arraste ao pivô central (ALMEIDA, 2016).

O IRGMO é constituído por uma linha principal (linha lateral) com saídas, as quais são acopladas às linhas de derivação (gotejadores) que podem ser de tubos flexíveis, rígidos ou em queda (pendural), sendo elas

arrastadas pela área em função do movimento do equipamento. Apresenta vantagens, como: eficiência em até 95% quando dimensionados corretamente e maior eficiência ao uso da água; e desvantagem: eficiência na filtragem da água com uso de filtros com menos de 80 mesh (CRAIG, 2019).

### 2.3. Pivô Central no Brasil

De acordo com Silveira et al. (2013), o sistema de irrigação por pivô central é um método moderno que tem fornecido significativo desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil, tendo como a facilidade a instalação e o manejo do sistema, aumento da produtividade e qualidade da irrigação, parâmetros esses indicativos da aceitação do equipamento no campo.

Segundo dados da ANA (2019) a área total irrigada por município apontam uma alteração na distribuição espacial e na concentração da atividade no Brasil. Em 1985 oito municípios apresentavam área equipada por pivôs superior a mil hectares, sendo responsáveis por 44% da área total de 30.852ha; em 2000 o Brasil possuía 118 municípios com área equipada superior a mil hectares (concentrando 76% da área total), chegando a 253 no ano de 2017 (86% da área total).

A agricultura irrigada por pivôs centrais apresentou alto crescimento nas últimas décadas, e que se acelerou ainda mais a partir de 2010. Em 1985 foram identificados 363 pivôs centrais (pontos) irrigando uma área de 31 mil hectares. Em 2000 foram 490,5 mil hectares equipados para irrigação em 6.680 pontos. Em 2017 a área triplicou para 1 milhão e 476 mil hectares em 23.181 pontos. A área atual é 47 vezes maior do que a área mapeada em 1985 (ANA, 2019).

Dentre os principais municípios irrigantes estão Unaí e Paracatu em Minas Gerais, Cristalina em Goiás, Barreiras e Luiz Eduardo Magalhães na Bahia sendo estados limítrofes e constituem a maior concentração de pivôs do estado com 2.243 pivôs centrais ocupando uma área de 177 mil hectares (Tabela 1).

Tabela 1- Municípios com áreas equipadas por pivôs centrais acima de cinco mil hectares.

Estado	Município	Área Equipada	Nº de Pivôs	Área Média (ha/pivô)
MG	Unaí	61.151	663	92
GO	Cristalina	56.072	698	80
BA	Luís Eduardo Magalhães	16.298	177	92

Fonte: ANA, 2019.

Segundo Christofidis & Goretti (2019) a irrigação por *Pivô Central* tem um grande destaque em Minas Gerais. Encontra-se no estado 29% da área irrigada por este método de irrigação do Brasil. Os municípios que mais irrigam pelo método são: Unaí, irrigando uma área de 75 mil hectares e Paracatu, 62 mil hectares. Já em Goiás, encontra-se 15,7% da área irrigada pelo método: Cristalina, irriga 51 mil hectares pelo sistema de irrigação, apresentando uma grande diversidade de cultivos irrigados, apresentando mais de 50 atividades agrícolas ao longo do ano.

Com a forte expansão deste sistema, constata-se altos e baixos na evolução da área irrigada entre os anos 2000 a 2017 por pivô central no Brasil. Em um estudo realizado pela ABIMAQ (2018) analisou-se quedas e

incrementos em relação aos anos; no ano de 2000 houve um crescimento de aproximadamente 4,74 mil hectares (ha) na área irrigada; 5,05 mil em 2001; 5,79 mil em 2002; 5,95 em 2003; já no ano de 2004 a 2011 houve uma queda no crescimento, tendo seu pior ano como 2006; já em 2012 ele volta a crescer com 84 mil ha; 2013 com 126 mil; 2014 com 102 mil e voltando a cair em 2015, com 78 mil hectares, subindo novamente em 2016 com 91 mil ha e havendo um levantamento novamente em 2017 com 84,5 mil ha irrigados pelo sistema de irrigação pivô central.

De acordo com dados compilados pela ABIMAQ (2018) certifica-se que desde a execução do censo 2000 que o sistema de irrigação por pivô central representa cerca de 44 % do acréscimo da área irrigada no País.

O governo federal propõe legislações que facilitam a compra e o pagamento destes equipamentos, como por exemplo: 1) *Moderinfra*, criado em 2004, que tem por objetivo financiar a implantação, a ampliação, a renovação/reconversão de sistemas de irrigação inclusive obras de infraestrutura associadas. 2) *Programa especial de financiamento Agrícola*, também criado em 2004, que objetiva financiar equipamentos aos produtores rurais do BACEN (Banco Central Nacional). 3) *Pronaf*, criado em 1995, que visa dar o apoio financeiro ao produtor rural que desenvolve atividades agropecuárias e não agropecuárias utilizando-se da mão de obra familiar (NASCIMENTO; PIZAIA; CAMARA, 2007).

## 2.4. Estrutura Tarifária da Energia Elétrica

De acordo com estudos realizados nos anos 80 foi certificado que a representação do consumo de energia ao longo do dia estava vinculado aos hábitos do consumidor, além das características próprias do mercado de cada região. Fundamentando nestas características originou-se, a nova Estrutura Tarifária Horosazonal, em que as tarifas são diferenciadas, de acordo com os diferentes períodos do ano e horários de utilização do dia (ANEEL 2012), conforme especificação a seguir:

Divisão do ano:

-Período úmido: período de cinco meses consecutivos, de dezembro a abril. É, geralmente o período com mais chuvas e conseqüentemente há um maior potencial para geração de energia hidroelétrica, o preço de energia elétrica se torna menor.

-Período seco: período de sete meses consecutivos, de maio à novembro. É, geralmente um período com poucas chuvas, conseqüentemente com pouca disponibilidade de água nos reservatórios das hidrelétricas e as tarifas deste período podem ser mais elevadas.

Divisão do dia:

Segundo Medeiros (2010) dentro de cada um dos dois períodos (úmido ou seco), o consumo de energia varia ao longo do dia.

Horário de ponta: definido pela concessionária e composto por três horas consecutivas, entre 18:00 e 21:00, atingindo um valor máximo por volta das 19:00, acontece uma sobrecarga no sistema elétrico, o que implica em um maior custo a energia neste período.

Horário fora de ponta: período restante do dia, composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas complementares àquelas definidas no horário de ponta, em que a energia está disponível a um custo menor. Considerando o período das 23:00 às 5:00 o consumo de energia é ainda menor, havendo uma

maior disponibilidade e conseqüentemente os usuários podem ter um desconto no valor da energia consumida neste horário, ou seja, o preço da energia elétrica neste período é diferenciado, no caso da irrigação- tarifa noturna (Tabela 2).

Tabela 2- Períodos do dia e classificação de horários.

Período	Divisão do dia
Horário de Ponta	18:00 às 21:00 (3 horas)
Horário Fora de Ponta	06:00 às 18:00 e 21:00 às 21:30 (12,5horas)
Horário Reservado	21:30 às 06:00 (8,5 horas)

Fonte: ANEEL (2006).

Ainda de acordo com Medeiros (2010), no Brasil as tarifas de energia elétrica são estruturadas em dois grandes grupos de consumidores: 'Grupo A e Grupo B'.

O Grupo A são atendidos por redes de alta tensão, trifásicas, cuja potência dos transformadores variam de 112,5 a 1000 kVA, em tensão igual ou superior a 2,3 kV, já o Grupo B, são atendidos por redes monofásicas, com tensão inferior, com transformadores variando de 5 a 37,5 kVA, e por redes trifásicas, com potências variando de 15 a 75 kVA.

As tarifas do Grupo A são construídas em três modalidades de fornecimento:

-Tarifa convencional: possui preço único para demanda de potência e para consumo de energia, não interferindo no período de utilização. É atendida nesta tarifa tensões inferiores a 69 kV e demandas menores que 500 kW. O custo final de fornecimento de energia elétrica é gerado pelo somatório dos custos de demanda e consumo.

$$\text{Custo Final (R\$)} = C T_c + D T_d \quad (1)$$

Em que:

$C$ : consumo (kWh);

$T_c$ : tarifa de energia elétrica (R\$ kW<sup>-1</sup>);

$D$ : demanda (kW); e

$T_d$ : tarifa de demanda (R\$ kW<sup>-1</sup>).

-Tarifa horo-sazonal: permite um aproveitamento melhor da energia elétrica disponível, pois pode-se haver o deslocamento do consumo para horários e períodos do ano em que o preço é mais baixo. Existe dois tipos:

-Tarifa azul: destinada aos grandes consumidores com potência superior a 500 kW em que o custo final do fornecimento de energia elétrica é composto por demanda de potência (kW)-preços diferenciados para horários de ponta e fora de ponta, e consumo de energia elétrica (kWh)- preços diferenciados para horários de ponta e fora de ponta e também entre os períodos do ano úmido e seco.

$$\text{Custo Final (R\$)} = D_c T_d + C_p T_{cp} + C_{fp} T_{fp} \quad (2)$$

Em que:

$D_c$  : demanda contratada (kW);

$T_d$ : tarifa de demanda (R\$ kW<sup>-1</sup>);

$C_p$ : consumo de energia em horário de ponta (kWh);

$T_{cp}$ : tarifa de consumo em horário de ponta (R\$ kWh<sup>-1</sup>);

$C_{fpp}$ : consumo de energia elétrica em horário fora de ponta (kWh); e

$T_{fpp}$ : tarifa de consumo em horário fora de ponta (R\$ kWh<sup>-1</sup>).

No caso de ultrapassagem, será acrescido um valor relativo à ultrapassagem no período de ponta e no período fora de ponta.

$$\text{Custo Final (R\$)} = D_c T_d + (D_m - D_c) T_u + C_p T_p + C_{fpp} T_{fpp} \quad (3)$$

Em que:

$D_m$  : demanda medida (kW); e

$T_u$ : tarifa de demanda de ultrapassagem (R\$ kW<sup>-1</sup>).

-Tarifa verde: destinada aos consumidores de médio porte, com demandas entre 50 kW e 500 kW, atendidas na tensão de fornecimento na faixa de 2,3 kV a 44 kV. Sua tarifação possui dois componentes que definem o preço, demanda de potência- em que só existe um preço para a demanda fora de ponta, e consumo de energia elétrica- preços diferenciados para os horários de ponta e fora de ponta e também para os períodos do ano, podendo ser acrescida de um valor devido a energia reativa.

$$\text{Custo Final (R\$)} = D_c T_d + C_p T_p + C_{fpp} T_{fpp} \quad (4)$$

Caso haja ultrapassagem da demanda, a composição do custo final será acrescida de um valor relativo à ultrapassagem.

$$CF = D_c T_d + (D_m - D_c) T_u + C_p T_p + C_{fpp} T_{fpp} \quad (5)$$

De acordo com Almeida et al., (2016) os faturamentos de consumo e demanda dependerão do enquadramento dos requisitos em que o irrigante se encontra, ou seja: tarifa verde, azul ou convencional, além dos diferentes horários de aplicação de tarifas.

Ao Grupo B aplica-se a o processo de tarifa única, cobrada sobre o consumo, dependendo do tipo de contrato o consumidor poderá ainda ser beneficiado pela tarifa reduzida, no caso de irrigantes (tarifa noturna).

$$CF = C T_c \quad (6)$$

No final do ano de 2018, o então presidente Michel Temer com o objetivo de reduzir os descontos concedidos à tarifa de energia elétrica nos próximos cinco anos publicou o decreto Nº 9.642, o qual retira gradualmente (20% ao ano) o desconto que é dado a todas as unidades de consumo com classificação 'rural' (CNA, 2019).

Segundo a CNA (2019) surgiram entendimentos equivocados de que os descontos concedidos aos irrigantes e aquicultores no período reservado (21:30 às 06:00) seriam eliminados, o qual continua válido, garantidos pela Lei nº 10.438 de 2002. O impacto ocorrerá devido à eliminação da acumulatividade de desconto que os produtores tinham durante este horário.

Como mencionado acima, os produtores rurais podem ser enquadrados em duas categorias de consumidores: A e B. No grupo B as unidades possuíam desconto de 30% sobre a tarifa básica e para irrigantes e aquicultores acumulavam descontos de 60 a 73% para o período reservado dependendo da região. Com o decreto, os descontos na tarifa cairiam de 30% para 24% em 2019, reduzindo 6% ao ano até 2023. Já no grupo A recebia 10% de desconto em relação à tarifa básica, no horário reservado os descontos são de 70 a 90% para irrigantes e aquicultores e já não eram cumulativos. Após o decreto, o desconto será de 8% sobre a tarifa, reduzindo 2% ao ano até 2023, os horários reservados não terão alteração, pois já não eram cumulativos (CNA, 2019).

Como mencionado, o desconto para irrigantes estabelecido como desconto noturno dependerá da região em que o irrigante se encontra, retratados na tabela 3 abaixo, como descritos por Miranda (2016); ANEEL (2000).

Tabela 3- Porcentagem de desconto especial para irrigantes de acordo com as diferentes regiões do País.

Regiões do Brasil	Desconto
Nordeste e outros municípios da área de atuação da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste-SUDENE, conforme o art. 2º do Anexo I do Decreto no 6.219, de 2007	90%
Norte, Centro-Oeste e demais Municípios do estado de Minas Gerais	80%
Demais Regiões	70%

Fonte: Adaptada conforme Resolução Normativa 479/2012 (ANEEL, 2000).

Para o estudo, não foi levado em consideração as devidas mudanças, pois os dados já haviam sendo trabalhados no final de 2018, além da mudança ainda ter sofrido uma porcentagem pequena em um ano, não causaria mudanças abruptas, o que ocorreria em um acúmulo de anos.

## 2.5. Custos de Energia Elétrica para Irrigação

A energia elétrica é um *input* fundamental à sociedade, essencial ao desenvolvimento socioeconômico das nações. A principal fonte de geração de energia no Brasil é a hidrelétrica (água corrente dos rios), a qual representa 62% da capacidade instalada em operação no país, seguida das termoeletricas, com

28% e o restante são provenientes de usinas eólicas, biomassa, co-geração e importação de outros países (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2000).

Desde 2015 as contas de energia elétrica passaram a empregar o sistema de bandeiras tarifárias (verde, amarela e vermelha tipos 1 e 2) as quais indicam a diferença no preço em função das condições de armazenamento de água nas barragens das hidroelétricas. Em condições normais de chuvas no ano, as tarifas são definidas de acordo com a bandeira verde, caso a situação seja adversa, são acionadas as demais bandeiras (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2000).

Segundo Costa et al. (2017) as bandeiras tarifárias podem retardar a expansão da área irrigada, devido ao aumento de custos aos irrigantes. Essa despesa adicional pode também dificultar atividades de produtores irrigantes em culturas que constitui a alimentação básica dos brasileiros. Em consequência a correção dos preços e da introdução das bandeiras, consequentemente aumento no custo da energia, reduziu-se a área e o volume da irrigação causando desabastecimento e aumento dos preços das frutas, hortaliças e feijão em 2016, demonstrando a importância do custo da energia na segurança alimentar dos brasileiros.

Perroni et al. (2011), evidenciam sobre a viabilidade econômica de um sistema de irrigação devido a fatores como custo de energia, afirmando a necessidade de um estudo aprofundado das variáveis econômicas que envolvam o projeto.

Segundo Boyer et al., (2014) o custo de energia é uma das variáveis mais importantes da agricultura irrigada, principalmente em épocas de crises energéticas e com reajustes constantes das tarifas. Moraes et al. (2014) mostraram em estudo de automação com o uso de inversores de frequência em sistema de bombeamento em um equipamento do tipo pivô central, foi possível gerar uma economia de 18 a 52% no gasto de energia elétrica.

## **2.6. Dimensionamento Econômico**

Entre os sistemas de irrigação mais disseminados no mundo atualmente estão os sistemas por aspersão convencional e por pivô central; sendo o segundo muitas das vezes empregado sem os fundamentos necessários para que se possa obter o rendimento máximo do uso da água e energia elétrica. O excesso do uso da água aumenta o gasto com energia elétrica, podendo chegar a 25% dos custos de produção da cultura, diminuindo assim a renda do produtor (MORENO et al., 2010).

Segundo Moraes et al., (2014) o excessivo gasto de energia em equipamentos de irrigação pode ser causado por diversos problemas, como procedimentos operacionais, erros no dimensionamento técnico, déficit de manutenção preventiva ou corretiva, baixo rendimento dos equipamentos elétricos/hidráulicos, inadequados contratos de energia elétrica ou até mesmo lâmina d'água inadequadamente aplicada.

Como medida para redução dos custos, aconselha-se o estudo econômico que viabilize o melhor diâmetro da tubulação, além da escolha do conjunto motobomba, diminuindo assim os investimentos em execução e manutenção do equipamento.

Levando em consideração que o custo total depende dos investimentos iniciais do sistema de irrigação do tipo pivô central, os quais dependem diretamente dos custos dos diâmetros da tubulação, o diâmetro

econômico será o que proporcionará o custo total mínimo da instalação. Um diâmetro maior resultará em uma perda de carga pequena, logo a altura manométrica e a potência do conjunto motobomba serão relativamente pequenas, reduzindo os custos operacionais, mas em contra partida, o custo de investimento da tubulação será elevado. Por outro lado, para uma determinada vazão, quanto menor o diâmetro, maior será a perda de carga, proporcionando um aumento na altura manométrica e conseqüentemente na potência consumida no bombeamento (MEDEIROS, 2010).

O comportamento dos custos de investimento, operacional e total podem ser visualizados na figura 1. Deste modo, procura-se quantificar os custos de investimentos necessários à implantação de um sistema e os relacionados à operação do equipamento, para um conjunto de diâmetros de tubulações pré-selecionados e por comparação seleciona-se o qual apresenta o menor custo total, logo, para o dimensionamento econômico, deve-se analisar o custo total do sistema para diferentes valores de diâmetros (CARVALHO & OLIVEIRA, 2008).

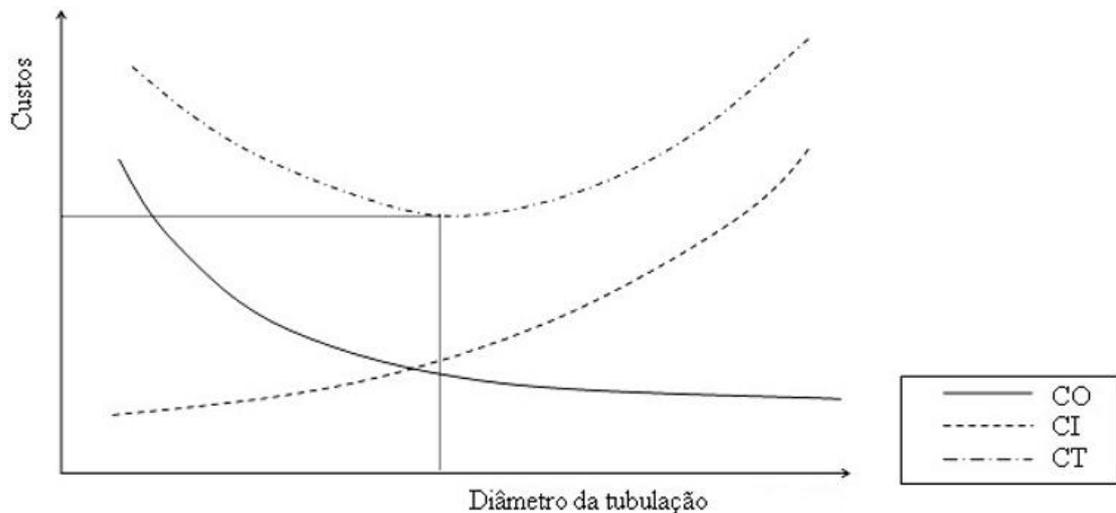


Figura 1- Variação dos custos operacionais (CO), de investimento (CI) e total (CT) de um sistema de bombeamento em função do diâmetro da tubulação (CARVALHO & OLIVEIRA, 2008).

De acordo com Gomes (2004) para a determinação do diâmetro da tubulação de uma estação elevatória, a metodologia mais adequada consiste na '*Introdução do Critério Econômico*', de modo a determinar a alternativa de projeto que diminua o custo de implantação e operação, ao longo da vida útil do equipamento; enquanto Zocoler (2003) retrata um hábil estudo para a determinação da alternativa mais econômica, sendo considerados os custos de implantação e operação do pivô central ao longo de sua vida útil.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Localização e Caracterização dos Locais em Estudo

O presente estudo foi desenvolvido nas três regiões do Brasil que representam 'polos estratégicos' do pivô central do país, Minas Gerais (Sudeste), Goiás (Centro-Oeste) e Bahia (Nordeste). A escolha destes estados foi dada pela grande representação deste sistema de irrigação na área irrigada brasileira.

As características das regiões em estudo podem ser visualizadas na Tabela 4.

Tabela 4- Coordenadas geográficas, altitude, clima e solo predominante em Unaí, Luís Eduardo Magalhães e Cristalina.

Cidades	Coordenadas Geográficas (UTM)		Altitude média (m)	Clima (Classificação de Koppen)	Solo Predominante
	Latitude	Longitude			
Unaí	-16,3518	-46,9120	565	Aw	Latossolo vermelho
Luís Eduardo Magalhães	-12,0994	-45,7983	769	Aw	Latossolo vermelho-Amarelo
Cristalina	-16,7679	-47,6131	1237	Aw	Latossolo vermelho

Para os diferentes sistemas de irrigação à medida que a área irrigada aumenta, o custo do investimento tende a ser menor. O sistema de irrigação do tipo pivô central se enquadra neste caso, conforme se aumenta a área irrigada, o custo por hectare tende a ser menor, pois o custo para aumentar um vão é fixo, porém a área da coroa aumenta em função do quadrado do raio. No Brasil o tamanho dos pivôs centrais é variável, existindo equipamentos relativamente grandes em Tocantins com 532,34 ha e muito pequenos em São Paulo com 1,6 ha (GUIMARÃES; LANDAU, 2014).

Para o estudo foram adotadas 4 áreas fictícias diferentes: 50; 80; 100 e 125ha e 2 vazões calculadas de acordo com a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) de cada uma das três regiões (Unaí, Luís Eduardo Magalhães e Cristalina), ou seja, tivemos 24 linhas laterais mais econômicas dentre todas as simulações.

A lâmina bruta foi calculada pela demanda hídrica de cada região para um período de 38 anos (1979 a 2017) através da variação da ET<sub>o</sub> estimado por Penman-Monteith por recomendações da FAO 56.

#### 3.2. Determinação da Lâmina de Água Aplicada

A lâmina líquida foi calculada de acordo com a análise do potencial hídrico de cada região (Equação 7).

$$Lâm_l = Eto Kc \quad (7)$$

Em que:

$Lâm_l$ : lâmina líquida (mm);

$Eto$ : evapotranspiração de referência (mmdia<sup>-1</sup>); e

$Kc$ : coeficiente máximo da cultura.

A vazão de projeto utilizada para o dimensionamento econômico para cada equipamento em estudo foi calculada pela equação abaixo (Equação 8).

$$Q_p = \frac{L\lambda m_l}{T_{irrig}A} \quad (8)$$

Em que:

$Q_p$ : vazão do projeto ( $m^3h^{-1}$ );

$T_{irrig}$ : tempo de irrigação ( $h\text{dia}^{-1}$ ); e

$A$ : área irrigada ( $m^2$ ).

O coeficiente máximo da cultura foi definido como 1,2 e o tempo de irrigação como 21 horas ao dia.

### 3.2.1 Variáveis Meteorológicas - Composição das Séries Históricas

Para composição da série histórica em escala de tempo diária e representativa das três regiões, foi criada uma estação concisa a partir de registros de dados da própria estação meteorológica do INMET, disponíveis no banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa (BDMEP) e ajuda do DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) em sua ferramenta 'WheaterMan', onde se torna possível estimar os dados faltantes com base em um algoritmo que considera os outros registros (sem falhas) para preenchimento da série dos dados faltantes (com falhas).

### 3.2.2 Correção de falhas- Dados faltantes

Perante os registros de dados (série histórica) da estação meteorológica do INMET referente às cidades avaliadas e considerando a ocorrência de falhas, foram estabelecidos parâmetros para preenchimento das mesmas pela ferramenta *WheaterMan*: Temperatura máxima ( $T_{max}$ ), Temperatura mínima ( $T_{min}$ ), insolação (h) e precipitação pluvial (mm).

De acordo com recomendações de Allen et al., (1998) dados faltantes da velocidade do vento poderão ser considerados iguais a  $2 \text{ m s}^{-1}$  (média da série).

### 3.2.3 Cálculo da ETo e Análise de Probabilidade

Após o preenchimento das falhas de acordo com *WheaterMan* e as recomendações feitas por Allen et al., (1998) a série histórica completa foi inserida no software *Ref ET* (Reference Evapotranspiration Calculator) para cálculo padrão da Evapotranspiração de Referência (ETo). Foi utilizado como padrão o módulo FAO56 PM.

Com a ETo referente a cada dia analisado foi realizado o percentil através do software *Excel* para análise de diferentes níveis de 'atendimento' da demanda atmosférica, do dia 01 do ano 1978 ao 2017 com

diferentes porcentagens (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100), do dia 02 e assim sucessivamente para os 365 dias.

Após a análise utilizou-se como referência para projeto do sistema de irrigação pivô central o percentil da *Evapotranspiração* (ET) para as probabilidades de ocorrência em 50 e 80% (nível de atendimento médio e pleno da demanda atmosférica) (Tabela 5) a qual multiplicada pelo coeficiente máximo da cultura (Kc) adotado como 1,2 e por cada área irrigada, obteve-se a vazão de projeto e a partir destes dados foi dimensionada a linha lateral do equipamento pivô central mais econômico, para cada região.

Tabela 5- Eto para os níveis de demanda atmosférica a 50 e 80% respectivamente, para os municípios em estudo.

Município	ET (mm)	
Unaí	3,71	4,55
Luís Eduardo Magalhães	4,44	4,99
Cristalina	4,30	4,82

### 3.2.4 Análise do Somatório Mensal para cálculo da jornada de trabalho

Para a determinação dos dias de irrigação por ano do sistema, foram alinhados os somatórios mensais de precipitação entre os anos de 1979 à 2017, e considerados para estudo os meses em que a precipitação acumulada se manteve inferior a 100 mm. Foi realizado o somatório dos meses em que a precipitação se manteve inferior, para cada um dos anos, e a partir do somatório, calculou-se a média da soma do intervalo dos anos. Multiplicando-se pela média de dias do mês (30 dias), foi obtida a jornada de trabalho para cada município em estudo.

A quantidade de meses com precipitação mensal inferior a 100 mm pode ser observada no gráfico (Figura 2). Para uma melhor visualização foi realizada a média móvel das flutuações dos dados referentes à quantidade de meses com precipitação baixa.

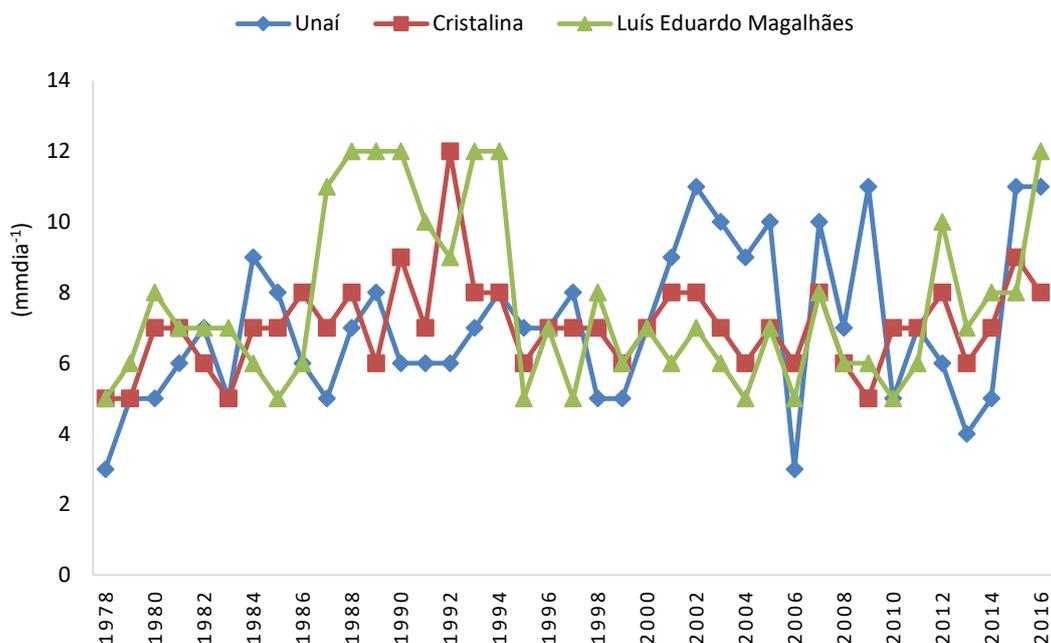


Figura 2 - Gráfico das demarcações dos meses com PPT inferior a 100 mm referentes às cidades em estudo.

A quantidade de dias irrigados ao ano por município podem ser vistos na tabela 6.

Tabela 6- Média dos meses com precipitação abaixo de 100 mm e quantidade de dias de irrigação ao ano para os municípios de Unai, Cristalina e Luís Eduardo Magalhães.

Município	Média ( $\sum$ meses<100mm)	Dias irrigados ao ano
Unai	7,05	212
Cristalina	7,05	212
Luís Eduardo Magalhães	7,62	229

### 3.3. Configurações da linha lateral

Segundo Frizzone (2018) o estudo da linha lateral de um pivô central é importante para a seleção dos emissores e diâmetro dos bocais, reguladores de pressão, canhão final ou o sistema de canto articulado e também para o cálculo do ponto de operação da unidade de bombeamento.

Foi adotado para o dimensionamento da linha lateral do equipamento pivô central uma pressão de operação dos aspersores de 15 mca, a perda de carga localizada nas válvulas reguladoras de pressão de 5 mca e a altura da linha lateral 2,7 m. O desnível entre o ponto do pivô e a extremidade da linha lateral foi considerado nulo.

Para o cálculo da tubulação da linha lateral referente ao pivô central mais econômico foram dimensionados diferentes combinações de acordo com a tabela de preços da Empresa Valley (Quadro 1, 2, 3 e 4) através de três diâmetros internos, sendo eles: 10", 8 <sup>5/8</sup>" e 6 <sup>5/8</sup>". Apresentando como comprimento do vão

inicial 54,53 metros, o somatório dos diferentes vãos intermediários variando de acordo com a área irrigada: 317,65m; 423,53m; 476,47m e 529,42m, ou seja, caso a área irrigada apresente uma área de 50 hectares, foi encontrada uma variação de 6 vãos intermediários (6-0-0; 5-1-0; 4-2-0; 3-3-0; 2-4-0..), divididos em 3 diferentes simulações em que a soma seja igual a 6 tubos, e o balanço 26,82 m, apresentando raio irrigado de 399,0m; 504,90m; 557,83m e 610,77 m. A linha lateral, fabricada em aço zincado, apresenta o coeficiente C de 125 (coeficiente adimensional dependente da natureza do material da equação de perda de carga de Hazen Williams).

Quadro 1- Diferentes combinações de comprimentos (m) e diâmetros (mm) referentes à uma área irrigada de 50 ha.

PC	Inicial		Intermediário						Balanço		Lt
	L	D	1		2		3		L	D	
			L	D	L	D	L	D			
PC1		168,28	-		-			317,65			
PC2			317,65		-			-			
PC3			-		317,65			-			
PC4			-		-			317,65			
PC5			264,71		52,94			-			
PC6			-		264,71			52,94			
PC7			52,94		-			264,71			
PC8			211,77		105,88			-			
PC9			-		211,77			105,88			
PC10	54,53	254,00	105,88	254	-	219,08	211,77	168,28	26,82	168,28	399,00
PC11			158,82		158,82			-			
PC12			-		158,82			158,82			
PC13			158,82		-			158,82			
PC14			105,88		211,77			-			
PC15			-		105,88			211,77			
PC16			211,77		-			105,88			
PC17			52,94		264,71			-			
PC18			-		52,94			264,71			
PC19			264,71		-			52,94			

Quadro 2- Diferentes combinações de comprimentos (m) e diâmetros (mm) referentes à uma área irrigada de 80 ha.

PC	Inicial		Intermediário						Balanço		Lt
	L	D	1		2		3		L	D	
			L	D	L	D	L	D			
PC1		168,28	-		-		423,53				
PC2			423,53		-		-				
PC3			-		423,53		-				
PC4			-		-		423,53				
PC5			370,59		52,94		-				
PC6			-		370,59		52,94				
PC7			52,94		-		370,59				
PC8			317,65		105,88		-				
PC9			-		317,65		105,88				
PC10			105,88		-		317,65				
PC11			264,71		158,82		-				
PC12			-		264,71		158,82				
PC13	54,53	254,00	158,82	254,00	-	219,08	264,71	168,28	26,82	168,28	504,90
PC14			211,77		211,77		-				
PC15			-		211,77		211,77				
PC16			211,77		-		211,77				
PC17			158,82		264,71		-				
PC18			-		158,82		264,71				
PC19			264,71		-		158,82				
PC20			105,88		317,65		-				
PC21			-		105,88		317,65				
PC22			317,65		-		105,88				
PC23			52,94		370,59		-				
PC24			-		52,94		370,59				
PC25			370,59		-		52,94				

Quadro 3- Diferentes combinações de comprimentos (m) e diâmetros (mm) referentes à uma área irrigada de 100 ha.

PC	Inicial		Intermediário						Balanço		Lt
	L	D	1		2		3		L	D	
			L	D	L	D	L	D			
PC1		168,28	-		-			476,47			
PC2			476,47		-			-			
PC3			-		476,47			-			
PC4			-		-			476,47			
PC5			423,53		52,94			-			
PC6			-		423,53			52,94			
PC7			52,94		-			423,53			
PC8			370,59		105,88			-			
PC9			-		370,59			105,88			
PC10			105,88		-			370,59			
PC11			317,65		158,82			-			
PC12			-		317,65			158,82			
PC13	54,53		158,82		-			317,65			
PC14			264,71	254,00	211,77	219,08		-			
PC15		254,00	-		264,71			211,77	168,28	26,82	168,28
PC16			211,77		-			264,71			
PC17			211,77		264,71			-			
PC18			-		211,77			264,71			
PC19			264,71		-			211,77			
PC20			158,82		317,65			-			
PC21			-		158,82			317,65			
PC22			317,65		-			158,82			
PC23			105,88		370,59			-			
PC24			-		105,88			370,59			
PC25			370,59		-			105,88			
PC26			52,94		423,53			-			
PC27			-		52,94			423,53			
PC28			423,53		-			52,94			

Quadro 4- Diferentes combinações de comprimentos (m) e diâmetros (mm) referentes à uma área irrigada de 125 ha.

PC	Inicial		Intermediário						Balanço		Lt
	L	D	1		2		3		L	D	
			L	D	L	D	L	D			
PC1		168,28	-		-			529,42			
PC2			529,42		-			-			
PC3			-		529,42			-			
PC4			-		-			529,42			
PC5			476,47		52,94			-			
PC6			-		476,47			52,94			
PC7			52,94		-			476,47			
PC8			423,53		105,88			-			
PC9			-		423,53			105,88			
PC10			105,88		-			423,53			
PC11			370,59		158,82			-			
PC12			-		370,59			158,82			
PC13			158,82		-			370,59			
PC14			317,65		211,77			-			
PC15			-		317,65			211,77			
PC16	54,53	254	211,77	254	-	219,08		317,65	168,28	26,82	168,28
PC17			264,71		264,71			-			
PC18			-		264,71			264,71			
PC19			264,71		-			264,71			
PC20			211,77		317,65			-			
PC21			-		211,77			317,65			
PC22			317,65		-			211,77			
PC23			158,82		370,59			-			
PC24			-		158,82			370,59			
PC25			370,59		-			158,82			
PC26			105,88		423,53			-			
PC27			-		105,88			423,53			
PC28			423,53		-			105,88			
PC29			52,94		476,47			-			
PC30			-		52,94			476,47			
PC31			476,47		-			52,94			

Para a primeira simulação (PC1) a linha lateral apresentou diâmetro único de 6 5/8" (Figura 3). Na figura abaixo podemos verificar a combinação da tubulação inicial, vão intermediário fixo apenas pelo diâmetro 6 5/8" (D3) e balanço.

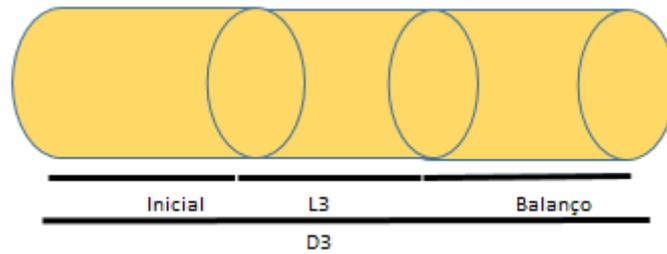


Figura 3- Modelo da tubulação da linha lateral do sistema de irrigação dimensionado para um diâmetro único.

Para as demais simulações da linha lateral do sistema de irrigação pivô central, foram dimensionadas diferentes combinações com até três diâmetros, de acordo com a área irrigada (Figura 4).

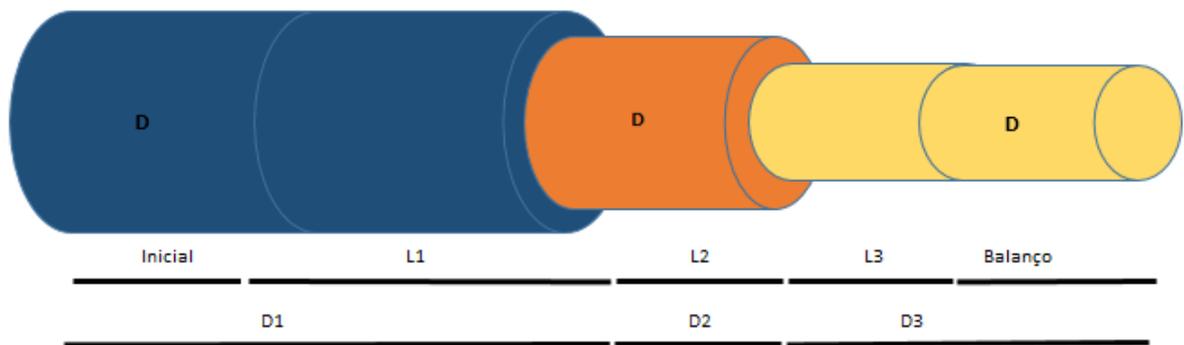


Figura 4- Modelo da tubulação da linha lateral do sistema de irrigação dimensionado apresentando três combinações de diâmetros (tubulação telescópica).

Para a análise econômica, foram utilizados os valores lineares (R\$metro<sup>-1</sup>) da linha lateral, apresentados conforme utilizados no dimensionamento na tabela 7.

Tabela 7- Custo por metro linear para diferentes diâmetros de tubulação.

	R\$metro <sup>-1</sup>		
Vãos	6 5/8"	8 5/8"	10"
Inicial	485,3	-	838,71
Intermediário	441,18	514,71	588,24
Balanço	485,3	-	-

Fonte: Valley.

### 3.4 Hidráulica da Linha Lateral

Scaloppi e Allen (1993) elaboraram soluções analíticas e apresentaram equações para calcular a distribuição de pressão ao longo da linha lateral de único diâmetro com e sem canhão final. A presença de um canhão muda as condições de escoamento ao final da linha, pois a vazão escoada no final não é zero, e sim a requerida pelo canhão.

Segundo Frizzone (2018), uma linha lateral de diâmetro único, com múltiplas saídas de água, a vazão que passa por uma seção qualquer da tubulação situada a uma distância da origem, pode ser aproximada para todos os pontos ao longo da linha lateral pelas proporções entre vazões e áreas irrigadas, conforme a equação 9.

$$Q_s = Q_0 \frac{\pi(R^2 - R_s^2)}{\pi R^2} = Q_0 \left[ 1 - \left( \frac{R_s}{R} \right)^2 \right] \quad (9)$$

Em que:

$Q_0$ : vazão de entrada na linha lateral ( $\text{m}^3\text{h}^{-1}$ );

$Q_s$ : vazão ao longo da linha lateral ( $\text{m}^3\text{h}^{-1}$ );

$R$ : raio irrigado (m); e

$R_s$ : distância do ponto central do pivô à seção (m).

De acordo com Frizzone (2018) em um sistema de irrigação do tipo pivô central a vazão e a perda de carga são reduzidas ao longo da linha lateral, e a vazão dos emissores também é variável, neste caso, o fator de redução de perda de carga ( $Fr$ ), o qual é utilizado devido a variação de vazão ao longo da linha, é diferente que o proposto por Christiansen (1942) para laterais de aspersão convencional.

Chu e Moe (1972) apresentaram que o valor de  $Fr$  para pivô central sem canhão é 0,54; Pair et al. (1975) mostram  $Fr$  igual a 0,56 quando há presença de canhão final.

De acordo com a fórmula da perda de carga utilizada, o valor do expoente ( $ev$ ) pode ser definido como 2 (fórmula universal) e 1,852 (fórmula de Hazen-Williams). Por meio de análises de Allen, Keller e Martin (2011) para diferentes distâncias do ponto do pivô, para dois valores distintos do expoente  $ev$  os valores assumidos pelo coeficiente  $F(rs/Lh)$  podem ser observados na figura 5, apresentada por Colombo.

Segundo Colombo (2003) em um pivô central com linha lateral de diâmetro único, com  $R_L/R$  variando entre 0,85 a 0,94 e a perda de carga calculada pela equação de Hazen-Williams, 40% da perda de carga total ocorrem no primeiro 1/4 do comprimento total, 70 a 75% ocorrem na primeira metade do comprimento e 90 a 95% ocorrem nos primeiros 3/4 do comprimento da linha lateral (Figura 5). Observa-se na figura 5 que para partes do comprimento do raio molhado superior a 0,75 a correção da perda de carga mantém-se próxima a 0,54.

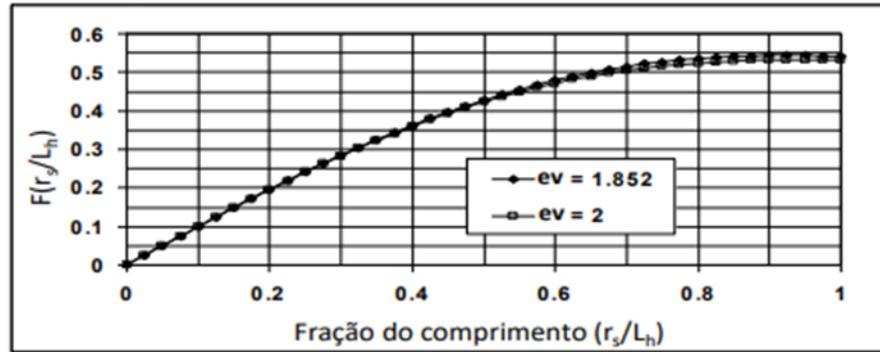


Figura 5 - Valor do fator de correção da perda de carga em pivô central para frações diferentes do comprimento do raio irrigado e dois diferentes valores do expoente  $ev$ .

Fonte: Colombo (2003).

Na figura 6 estão as dimensões do sistema de irrigação pivô central de acordo com a seção  $S$  sobre a linha lateral no raio irrigado.

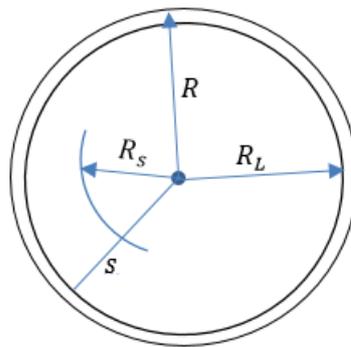


Figura 6- Esquema da seção  $s$  sobre a linha lateral com distâncias  $R_s$  e  $R_L$  do ponto do pivô. Representando:  $R$ : raio efetivo irrigado, com  $R \geq R_L$  (m);  $R_s$ : distância do ponto do pivô à seção  $s$  ( $m^3h^{-1}$ ); e  $R_L$ : comprimento físico da lateral (m).

Fonte: Elaborada pela autora com base em dados de Frizzone, 2018.

Para o cálculo da perda de carga em um trecho de comprimento  $R_s \leq R_L$  (Figura 6) sobre a linha lateral de um sistema de irrigação do tipo pivô central, Scaloppi e Allen (1993) desenvolveram uma solução analítica aproximada para o fator de correção  $F_r$ , a qual também pode ser aplicada para o cálculo da perda de carga nas linhas laterais com múltiplos diâmetros e infinitas saídas (Equação 10).

$$h_{f(R)} = \beta \frac{Q_0^m}{D^n} R = h_{f(R)} F_{(R_s/R)} \quad (10)$$

Em que:

$h_{f(R)}$ : perda de carga (m) na linha lateral de comprimento  $R$  e com diâmetro  $D$ ;

$F_{(R_s/R)}$ : fator de correção da perda de carga.

$Q_0$ : vazão de entrada ( $m^3/s$ );

$m$ : expoente vazão na equação de Hazen-Williams (1,852);

$n$ : expoente do diâmetro na equação de Hazen-Williams (4,87); e  
 $D$ : diâmetro interno (m).

Sendo  $\beta$  calculado pela equação 11.

$$\beta = \left( 10,65 / C^{1,852} \right) \quad (11)$$

$C$ : coeficiente adimensional dependente da natureza do material da equação de perda de carga de Hazen Williams.

Sendo o comprimento da linha lateral igual ao raio irrigado (R) e supondo que conduza vazão constante igual a que entra no início, o fator de correção  $F_{(R_S/R)}$  da perda de carga segundo Scaloppi & Allen (1993), pode ser expresso pela expressão 12.

$$F_{(R_S/R)} = \left[ \frac{R_S}{R} - \frac{m}{3} \left( \frac{R_S}{R} \right)^3 + \frac{m(m-1)}{10} \left( \frac{R_S}{R} \right)^5 - \frac{m(m-1)(m-2)}{42} \left( \frac{R_S}{R} \right)^7 + \dots \right] \quad (12)$$

Para as combinações para o pivô central com linha lateral composta por um ou dois trechos de diâmetros diferentes, a perda de carga foi calculada pela equação 13 (Frizzone, 2018).

$$H_{f(R_L)} = \beta \frac{Q_0^m}{D_1^n} R \left( F_{(R_1/R)} \right) + \beta \frac{Q_0^m}{D_2^n} R \left( F_{(R_L/R)} - F_{(R_1/R)} \right) \quad (13)$$

Ainda de acordo com Frizzone (2018), nos casos em que a tubulação do pivô central é composta por três diâmetros diferentes, a perda de carga foi calculada com a ajuda do software MathCad através de métodos analíticos, para a resolução das integrais (Equação 14).

$$H_{f(R_L)} = \frac{\beta Q_0^m}{D_1^n} \int_0^{R_1} \left[ 1 - \left( \frac{s}{R} \right)^2 \right]^m ds + \frac{\beta Q_0^m}{D_2^n} \int_{R_1}^{R_2} \left[ 1 - \left( \frac{s}{R} \right)^2 \right]^m ds + \frac{\beta Q_0^m}{D_3^n} \int_{R_2}^{R_L} \left[ 1 - \left( \frac{s}{R} \right)^2 \right]^m ds \quad (14)$$

### 3.5 Sistema de bombeamento

O sistema de bombeamento foi assumido considerando as diferentes condições de altura manométrica total, vazão do projeto e potência. A partir destes dados, foram adotados valores fixos para o rendimento da bomba de 78% com velocidade de rotação 1775 rpm, rendimento do motor de 95% e fator de potência 0,85.

### 3.6 Custo fixo e operacional

Para cálculo do custo anualizado do equipamento, foi considerado o valor médio da vida útil dos equipamentos em 20 anos, segundo recomendações do Proni (1987) e a taxa de juros foi aplicada de acordo com a média dos últimos 10 anos pela *Comissão de Políticas Monetárias do Banco Central* em 9,4%.

$$CF = C_{tubulação} FRC \quad (15)$$

Em que:

$C_{tubulação}$ : custo da tubulação da linha lateral (R\$); e

$FRC$ : fator de recuperação do capital (décimos).

O fator de recuperação do capital foi calculado pela equação 16 abaixo.

$$FRC = \frac{(1-i)^ni}{(1+i)^n-1} \quad (16)$$

Em que:

$CF$ : custo fixo ao ano (R\$);

$i$ : taxa de juros anual (décimos); e

$n$ : vida útil do sistema (anos).

Segundo as recomendações do PRONI (1987) os custos de manutenção do sistema devem ser calculados por um valor médio de 2% sobre os custos do investimento e da energia elétrica (Equação 17), o qual será calculado de acordo com a tarifas convencional de cada estado em estudo.

$$CO = 0,02 CFA + CT_{ee} \quad (17)$$

Em que:

$CO$ : custo operacional (R\$);

$CFA$ : custo fixo ao ano (R\$); e

$CT_{ee}$ : custo de energia elétrica (R\$).

Dessa forma, a combinação em estudo que apresentou menor soma do custo total dos diâmetros da linha lateral do equipamento juntamente ao custo operacional foi selecionada.

### 3.7 Análise Energética

Foi calculado o faturamento de demanda, por retratar o real valor sem alterações e descontos (Equação 18), e faturamento de consumo (Equação 19) para a tarifa convencional em cada pivô central em estudo, respeitando o enquadramento do desconto especial para irrigantes de acordo com cada uma das três regiões em estudo.

$$F_d = D_m T_{dc} \quad (18)$$

Em que:

$F_d$ : faturamento de demanda (R\$);

$D_m$ : demanda medida (kWh); e

$T_{dc}$ : tarifa de demanda convencional (R\$/kWh).

$$F_c = C_m T_{cc} \quad (19)$$

Em que:

$F_c$ : faturamento de consumo (R\$);

$C_m$ : consumo medido (kWh); e

$T_{cc}$ : tarifa de consumo convencional (R\$/kWh).

Tarifas de demanda e consumo foram adotadas de acordo com a tabela 8.

Tabela 8- Tarifação de energia elétrica para as regiões em estudo.

Modalidade	Regiões	Demanda (R\$/kWh)	Consumo (R\$/kWh)	Companhia
Convencional	Unai	0,27859	35,68	CEMIG
	Luis Eduardo	0,21906	49,36	CEAL
	Magalhães			
	Cristalina	0,27892	32,22	CELG

Fonte: Elaborada pela autora com base em dados de Costa, J. de Oliveira (2017).

Para o cálculo do fator de ajuste,  $\cos\phi$  foi fixo como 0,85 trabalhando com o carregamento do motor aproximadamente 85%.

$$ajuste = \left( \frac{0,92}{\cos\phi} - 1 \right) \quad (20)$$

Em que:

$ajuste$ : ajuste; e

$\cos\phi$ : fator de potência.

A partir dos cálculos anteriores foi calculado o custo total de energia elétrica demandada por cada sistema de irrigação do tipo pivô central em estudo (Equação 21).

$$CT_{ee} = (F_d + F_c) + (F_d + F_c).ajuste \quad (21)$$

Em que:

$CT_{ee}$ : custo total de energia elétrica (R\$).



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Dimensionamento Econômico

Para a análise econômica da linha lateral foram utilizadas diferentes vazões, calculadas através da variação da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) para diferentes níveis de atendimento médio (50%) e pleno (80%) da demanda atmosférica, e área irrigada, para cada uma das regiões em estudo (Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11).

Tabela 9- Dados de área irrigada, evapotranspiração e vazão para o município de Unai.

Área Irrigada (ha)	50		80		100		125	
Evapotranspiração	3,708	4,555	3,708	4,555	3,708	4,555	3,708	4,555
Vazão (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	106	131	170	209	212	261	265	326

Tabela 10- Dados de área irrigada, evapotranspiração e vazão para o município de Luís Eduardo Magalhães.

Área Irrigada (ha)	50		80		100		125	
Evapotranspiração	4,445	4,998	4,445	4,998	4,445	4,998	4,445	4,998
Vazão (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	127	143	204	229	254	286	318	357

Tabela 11- Dados de área irrigada, evapotranspiração e vazão para o município de Cristalina.

Área Irrigada (ha)	50		80		100		125	
Evapotranspiração	4,30	4,82	4,30	4,82	4,30	4,82	4,30	4,82
Vazão (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	123	138	197	221	246	276	308	345

#### 4.1.1 Dimensionamento para a Linha Lateral do Pivô Central

O valor da perda de carga total e pressão no ponto do equipamento pivô central podem ser observados nas figuras seguintes, considerando diâmetros equivalentes a 168,28 mm (6 <sup>5/8</sup>"), 219,075 (8 <sup>5/8</sup>") e 254 mm (10") e combinações variando de acordo com a área irrigada para as diferentes vazões para o município de Unai, Luís Eduardo Magalhães e Cristalina respectivamente.

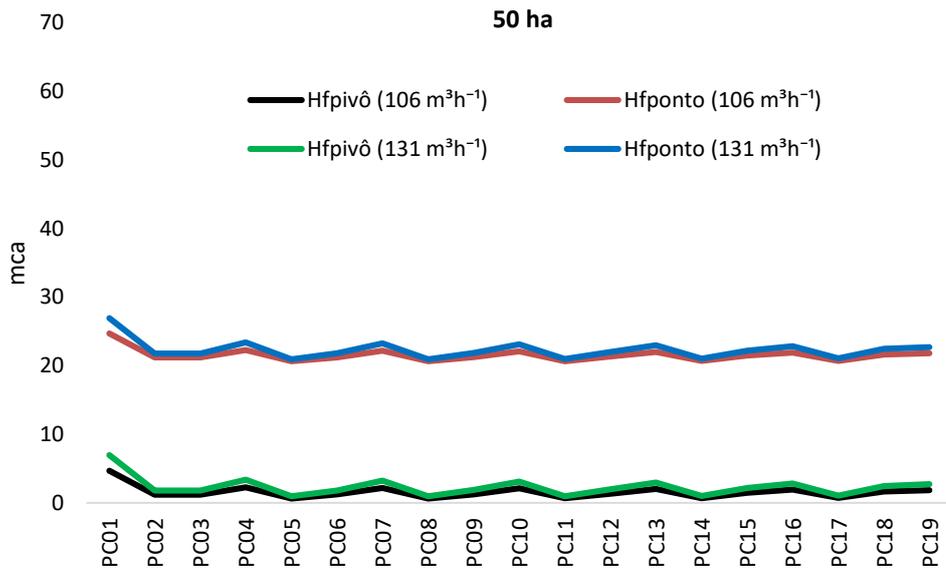


Figura 7- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 50 ha para as vazões de 106 e 131 m³h⁻¹, para o município de Unai.

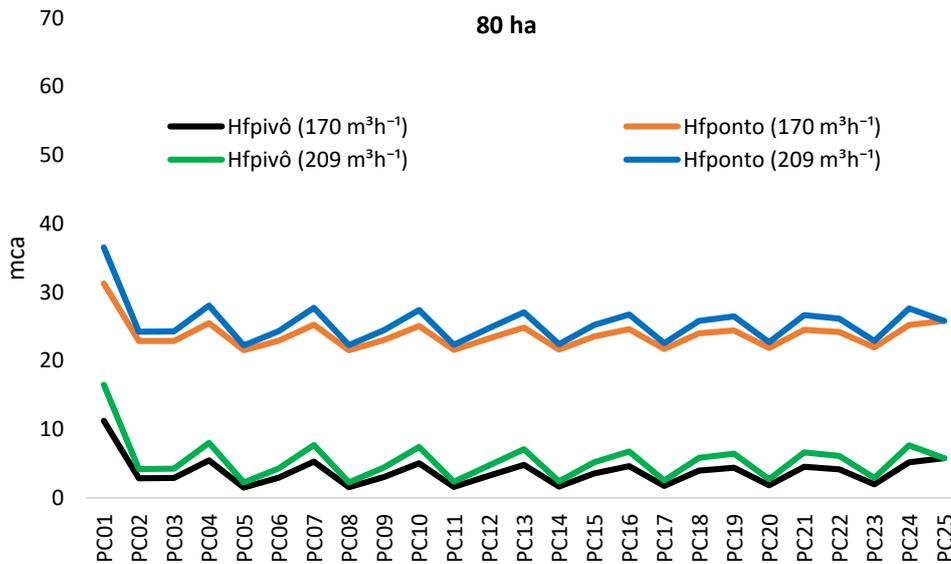


Figura 8- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 80 ha para as vazões de 170 e 209 m³h⁻¹, para o município de Unai.

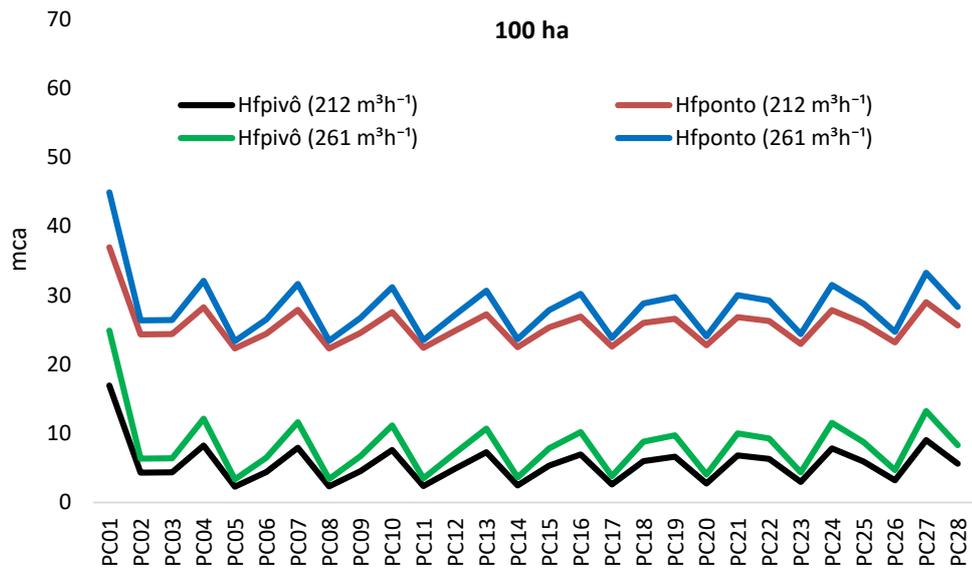


Figura 9- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 100 ha para as vazões de  $212 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$  e  $261 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ , para o município de Unai.

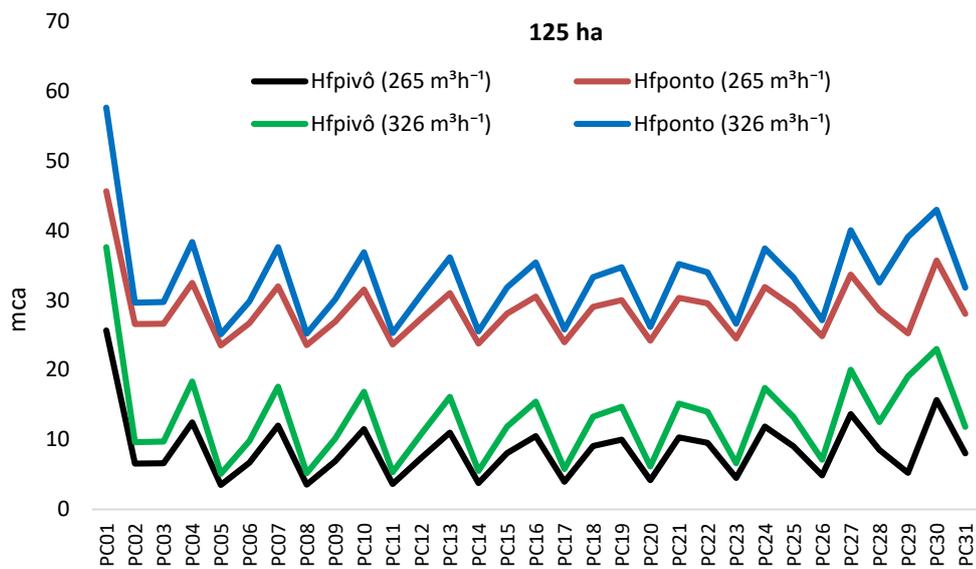


Figura 10- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 125 ha para as vazões de  $265 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$  e  $326 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ , para o município de Unai.

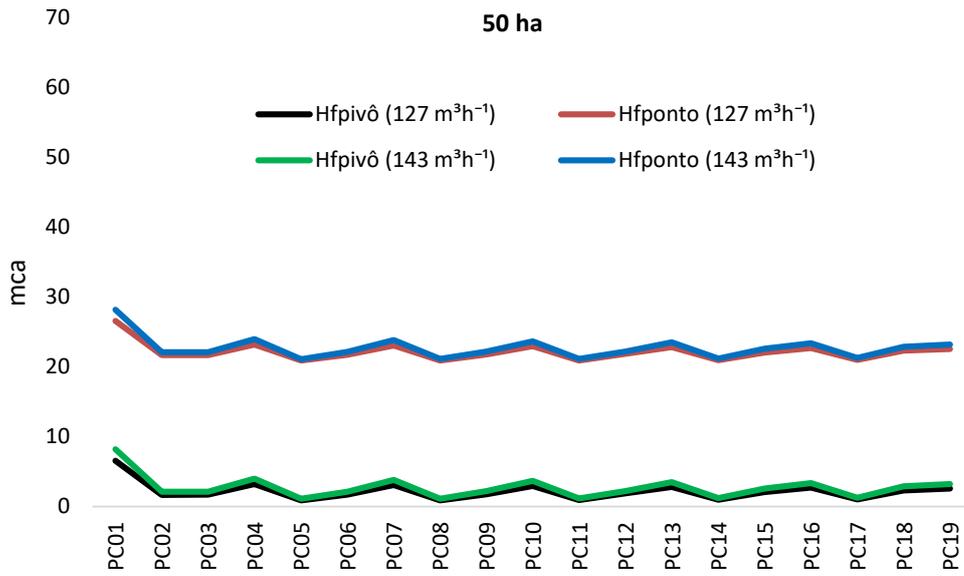


Figura 11- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 50 ha para as vazões de 127 e 143 m³h⁻¹, para o município de Luis Eduardo Magalhães.

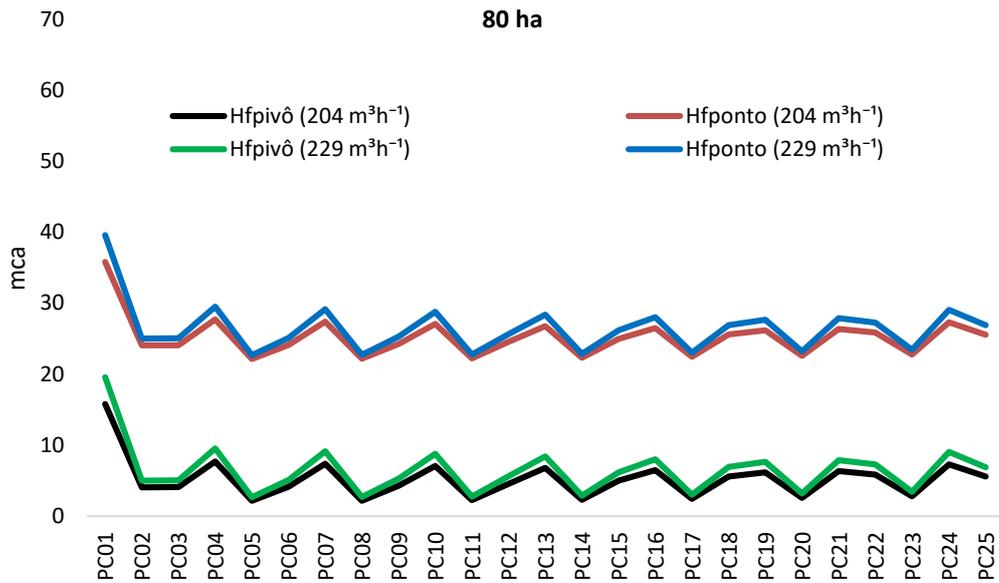


Figura 12- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 80 ha para as vazões 204 e 229 m³h⁻¹, para o município de Luis Eduardo Magalhães.

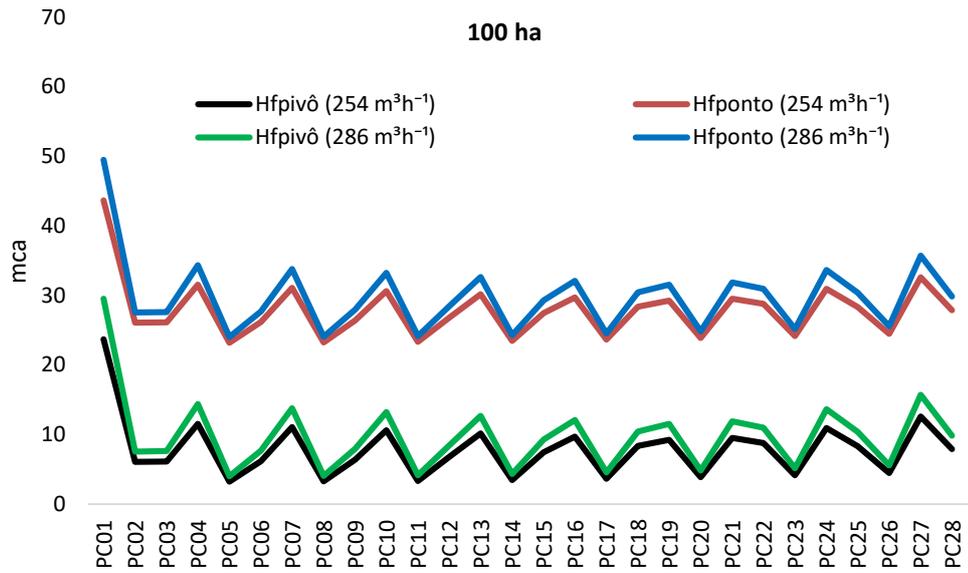


Figura 13- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 100 ha para as vazões 254 e 286 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>, para o município de Luis Eduardo Magalhães.

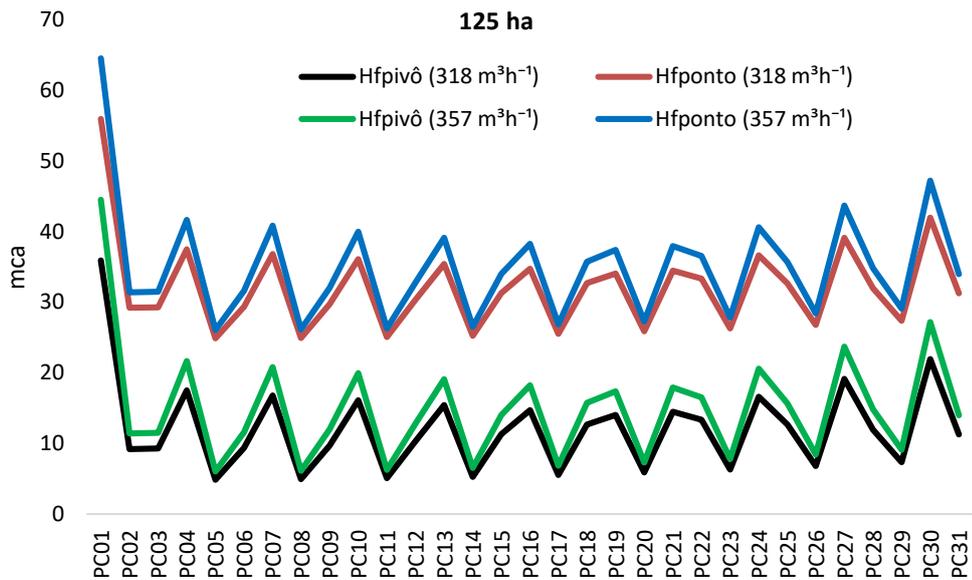


Figura 14- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 125 ha para as vazões 318 e 357 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>, para o município de Luis Eduardo Magalhães.

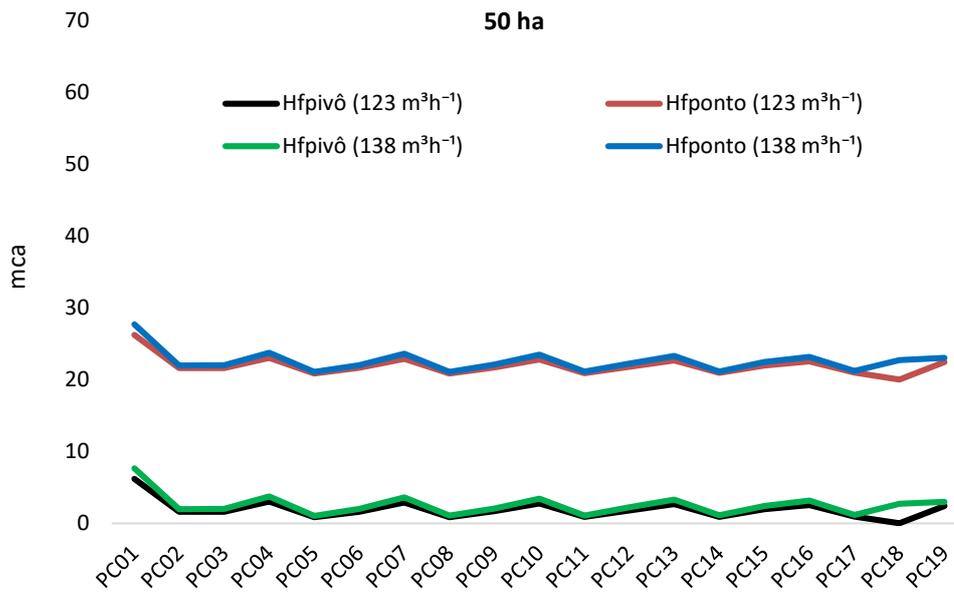


Figura 15- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 50 ha para as vazões 123 e 138 m³h⁻¹, para o município de Cristalina.

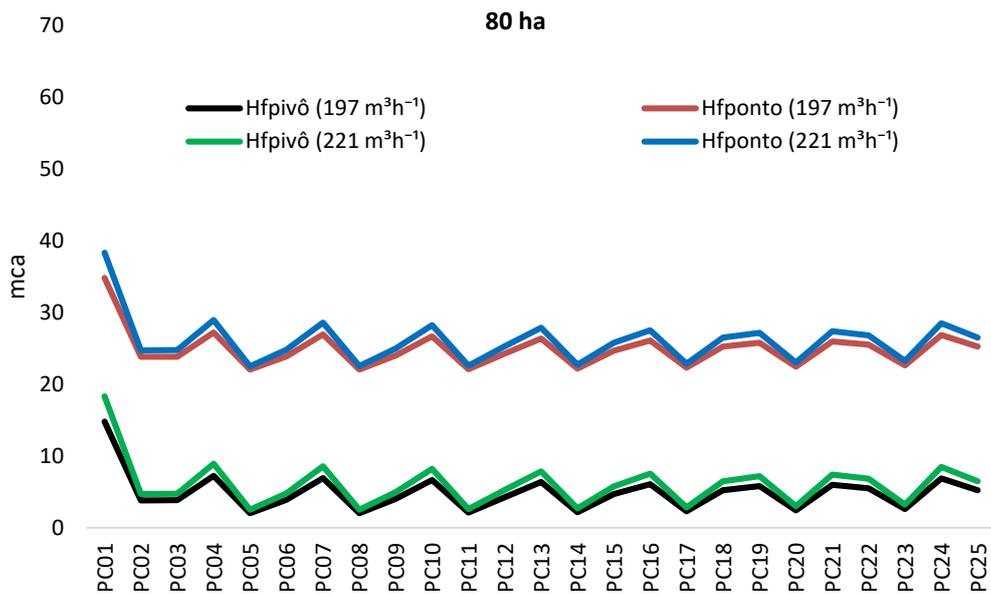


Figura 16- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 80 ha para as vazões 197 e 221 m³h⁻¹, para o município de Cristalina.

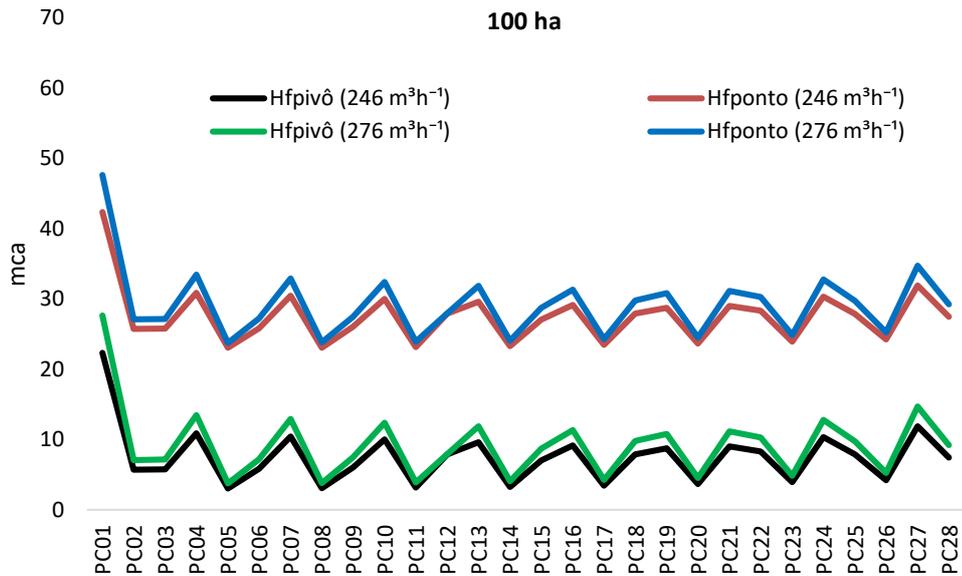


Figura 17- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 100 ha para as vazões 246 e 276  $\text{m}^3\text{h}^{-1}$ , para o município de Cristalina.

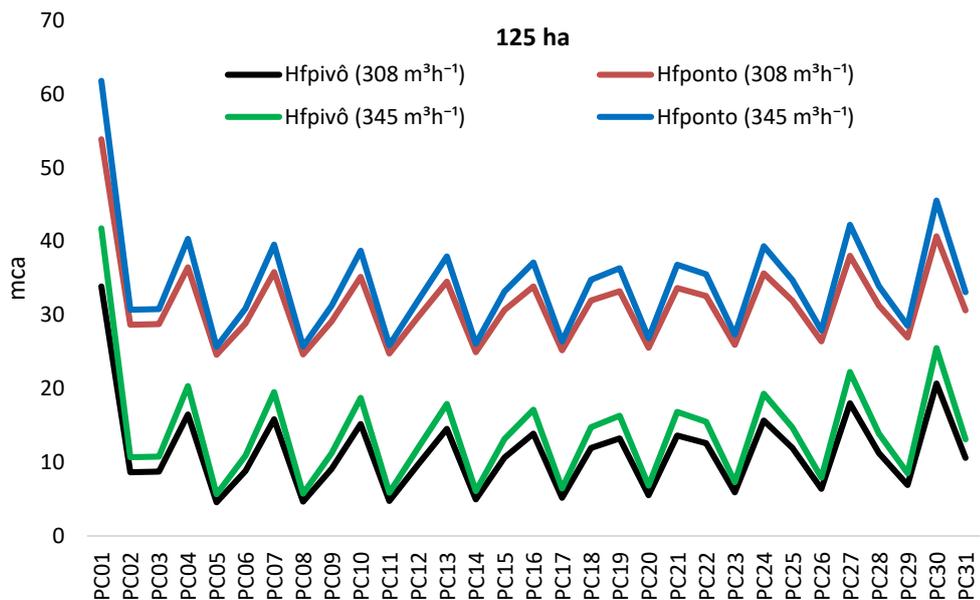


Figura 18- Perda de carga total e pressão no ponto do pivô referente a área irrigada de 125 ha para as vazões 308 e 345  $\text{m}^3\text{h}^{-1}$ , para o município de Cristalina.

Verifica-se nas figuras 7 à 18 que para uma vazão constante, como esperado, há uma diminuição da perda de carga com o aumento do diâmetro da tubulação, a qual se eleva com o aumento da vazão e estreitamento da tubulação, independente da área irrigada.

As maiores perdas de carga foram obtidas no PC1 em que toda a linha lateral é composta pelo diâmetro único de 168,28 mm. As menores perdas de carga foram obtidas na combinação PC2, em que o pivô central é composto pelo vão inicial e intermediário de 254 mm, o balanço de 168,28 mm e os comprimentos variando de acordo com a área do pivô central. Fazendo um comparativo entre as duas vazões para cada área

em estudo, verifica-se com a elevação da vazão, há um aumento da perda de carga tanto no ponto do pivô quanto na perda de carga total da linha lateral, segundo Medeiros (2010), ocorrido devido ao aumento da turbulência relativa ao escoamento da água.

De acordo com Alazba et al. (2012), a seleção do diâmetro da tubulação tem vital influência sobre o custo do sistema pivô central, estando inter-relacionada com a perda de carga e conseqüentemente com a seleção do conjunto motobomba. Portanto, a determinação da perda de carga trata-se de um elemento chave para a seleção do diâmetro apropriado e um parâmetro essencial nos projetos de sistemas de irrigação para equipamentos pivô central.

De acordo com Barbosa (2018), quando a linha lateral estiver em aclave em relação ao ponto central do pivô, ocorre uma redução na carga de pressão na entrada da linha lateral, ocasionando uma redução na velocidade de escoamento da água pela tubulação de sucção e conseqüentemente na perda de carga, ocorrendo de maneira contrária quando a lateral se posiciona no terreno onde há uma declividade mais acentuada, pois a vazão tende a se elevar. Este fato não se aplica ao presente estudo, pois os pivôs em análise foram considerados em nível.

O custo inicial da tubulação da linha lateral do pivô central considera o PC1 com diâmetro 168,28 mm e as demais combinações com 254 mm. O custo fixo considera o somatório somente das tubulações dos vãos iniciais, intermediários e o balanço para as combinações de acordo com a área irrigada (Tabelas 12, 13, 14 e 15); lembrando que os custos são os mesmos para as regiões, diferenciando apenas pelos diferentes tamanhos de áreas irrigadas.

Tabela 12- Custo fixo do pivô (R\$) para as diferentes combinações de tubulação referente à área de 125ha.

PC	Inicial	Inter 1	Inter 2	Inter 3	Balanco	Custo Fixo
PC1	26463,41	-	-	233567,75	13015,75	273046,91
PC2	45734,86	311423,67	-	-	13015,75	370174,27
PC3	45734,86	-	272495,71	-	13015,75	331246,31
PC4	45734,86	-	-	233567,75	13015,75	292318,35
PC5	45734,86	280281,30	27249,57	-	13015,75	366281,47
PC6	45734,86	-	245246,14	23356,78	13015,75	327353,52
PC7	45734,86	31142,37	-	210210,98	13015,75	300103,94
PC8	45734,86	249138,93	54499,14	-	13015,75	362388,68
PC9	45734,86	-	217996,57	46713,55	13015,75	323460,72
PC10	45734,86	62284,73	-	186854,20	13015,75	307889,54
PC11	45734,86	217996,57	81748,71	-	13015,75	358495,88
PC12	45734,86	-	190747,00	70070,33	13015,75	319567,92
PC13	45734,86	93427,10	-	163497,43	13015,75	315675,13
PC14	45734,86	186854,20	108998,28	-	13015,75	354603,09
PC15	45734,86	-	163497,43	93427,10	13015,75	315675,13
PC16	45734,86	124569,47	-	140140,65	13015,75	323460,72
PC17	45734,86	155711,83	136247,85	-	13015,75	350710,29
PC18	45734,86	-	136247,85	116783,88	13015,75	311782,33
PC19	45734,86	155711,83	-	116783,88	13015,75	331246,31
PC20	45734,86	124569,47	163497,43	-	13015,75	346817,50
PC21	45734,86	-	108998,28	140140,65	13015,75	307889,54
PC22	45734,86	186854,20	-	93427,10	13015,75	339031,90
PC23	45734,86	155711,83	136247,85	-	13015,75	350710,29
PC24	45734,86	-	136247,85	116783,88	13015,75	311782,33
PC25	45734,86	155711,83	-	116783,88	13015,75	331246,31
PC26	45734,86	124569,47	163497,43	-	13015,75	346817,50
PC27	45734,86	-	108998,28	140140,65	13015,75	307889,54
PC28	45734,86	186854,20	-	93427,10	13015,75	339031,90
PC29	45734,86	93427,10	190747,00	-	13015,75	342924,70
PC30	45734,86	-	81748,71	163497,43	13015,75	303996,74
PC31	45734,86	217996,57	-	70070,33	13015,75	346817,50

Tabela 13- Custo fixo do pivô (R\$) para as diferentes combinações de tubulação referente à área de 100ha.

PC	Inicial	Inter 1	Inter 2	Inter 3	Balanço	Custo Fixo
PC1	26463,41	-	-	210210,98	13015,75	249690,13
PC2	45734,86	280281,30	-	-	13015,75	339031,90
PC3	45734,86	-	245246,14	-	13015,75	303996,74
PC4	45734,86	-	-	11832,45	13015,75	70583,05
PC5	45734,86	249138,93	27249,57	-	13015,75	335139,11
PC6	45734,86	-	217996,57	11832,45	13015,75	288579,62
PC7	45734,86	31142,37	-	11832,45	13015,75	101725,42
PC8	45734,86	217996,57	54499,14	-	13015,75	331246,31
PC9	45734,86	-	190747,00	11832,45	13015,75	261330,05
PC10	45734,86	62284,73	-	11832,45	13015,75	132867,78
PC11	45734,86	186854,20	81748,71	-	13015,75	327353,52
PC12	45734,86	-	163497,43	11832,45	13015,75	234080,48
PC13	45734,86	93427,10	-	11832,45	13015,75	164010,15
PC14	45734,86	155711,83	108998,28	-	13015,75	323460,72
PC15	45734,86	-	136247,85	11832,45	13015,75	206830,90
PC16	45734,86	124569,47	-	11832,45	13015,75	195152,52
PC17	45734,86	124569,47	136247,85	-	13015,75	319567,92
PC18	45734,86	-	108998,28	11832,45	13015,75	179581,33
PC19	45734,86	155711,83	-	11832,45	13015,75	226294,88
PC20	45734,86	93427,10	163497,43	-	13015,75	315675,13
PC21	45734,86	-	81748,71	11832,45	13015,75	152331,76
PC22	45734,86	186854,20	-	11832,45	13015,75	257437,25
PC23	45734,86	62284,73	190747,00	-	13015,75	311782,33
PC24	45734,86	-	54499,14	11832,45	13015,75	125082,19
PC25	45734,86	217996,57	-	11832,45	13015,75	288579,62
PC26	45734,86	31142,37	217996,57	11832,45	13015,75	319721,98
PC27	45734,86	-	27249,57	11832,45	13015,75	97832,62
PC28	45734,86	249138,93	-	11832,45	13015,75	319721,98

Tabela 14- Custo fixo do pivô (R\$) para as diferentes combinações de tubulação referente à área de 80ha.

PC	Inicial	Inter 1	Inter 2	Inter 3	Balanço	Custo Fixo
PC1	26463,41	-	-	186854,20	13015,75	226333,36
PC2	45734,86	249138,93	-	-	13015,75	307889,54
PC3	45734,86	-	217996,57	-	13015,75	276747,17
PC4	45734,86	-	-	186854,20	13015,75	245604,80
PC5	45734,86	217996,57	27249,57	-	13015,75	303996,74
PC6	45734,86	-	190747,00	23356,78	13015,75	272854,37
PC7	45734,86	31142,37	-	163497,43	13015,75	253390,39
PC8	45734,86	186854,20	54499,14	-	13015,75	300103,94
PC9	45734,86	-	163497,43	46713,55	13015,75	268961,58
PC10	45734,86	62284,73	-	140140,65	13015,75	261175,99
PC11	45734,86	155711,83	81748,71	-	13015,75	296211,15
PC12	45734,86	-	136247,85	70070,33	13015,75	265068,78
PC13	45734,86	93427,10	-	116783,88	13015,75	268961,58
PC14	45734,86	124569,47	108998,28	-	13015,75	292318,35
PC15	45734,86	-	108998,28	93427,10	13015,75	261175,99
PC16	45734,86	124569,47	-	93427,10	13015,75	276747,17
PC17	45734,86	93427,10	136247,85	-	13015,75	288425,56
PC18	45734,86	-	81748,71	116783,88	13015,75	257283,19
PC19	45734,86	155711,83	-	70070,33	13015,75	284532,76
PC20	45734,86	62284,73	163497,43	-	13015,75	284532,76
PC21	45734,86	-	54499,14	140140,65	13015,75	253390,39
PC22	45734,86	186854,20	-	46713,55	13015,75	292318,35
PC23	45734,86	31142,37	190747,00	-	13015,75	280639,97
PC24	45734,86	-	27249,57	163497,43	13015,75	249497,60
PC25	45734,86	217996,57	-	23356,78	13015,75	300103,94

Tabela 15- Custo fixo do pivô (R\$) para as diferentes combinações de tubulação referente à área de 50ha.

PC	Inicial	Inter 1	Inter 2	Inter 3	Balanço	Custo Fixo
PC1	26463,41	-	-	140140,65	13015,75	179619,81
PC2	45734,86	186854,20	-	-	13015,75	245604,80
PC3	45734,86	-	217996,57	-	13015,75	276747,17
PC4	45734,86	-	-	186854,20	13015,75	245604,80
PC5	45734,86	155711,83	27249,57	-	13015,75	241712,01
PC6	45734,86	-	136247,85	23356,78	13015,75	218355,23
PC7	45734,86	31142,37	-	116783,88	13015,75	206676,84
PC8	45734,86	124569,47	54499,14	-	13015,75	237819,21
PC9	45734,86	-	108998,28	46713,55	13015,75	214462,44
PC10	45734,86	62284,73	-	93427,10	13015,75	214462,44
PC11	45734,86	93427,10	81748,71	-	13015,75	233926,42
PC12	45734,86	-	81748,71	70070,33	13015,75	210569,64
PC13	45734,86	93427,10	-	70070,33	13015,75	222248,03
PC14	45734,86	62284,73	108998,28	-	13015,75	230033,62
PC15	45734,86	-	54499,14	93427,10	13015,75	206676,84
PC16	45734,86	124569,47	-	46713,55	13015,75	230033,62
PC17	45734,86	31142,37	136247,85	-	13015,75	226140,82
PC18	45734,86	-	27249,57	116783,88	13015,75	202784,05
PC19	45734,86	155711,83	-	23356,78	13015,75	237819,21

Verifica-se que as combinações referentes aos vãos com diâmetros menores proporcionam um custo inferior para aquisição do sistema, mas conseqüentemente as perdas de cargas são maiores, requisitando uma maior potência no conjunto motobomba, propiciando um maior consumo de energia.

De acordo com as tabelas 12, 13, 14 e 15 e a Figura 19 observa-se o custo fixo da tubulação do equipamento pivô central em relação ao custo por área irrigada, quanto maior o anel irrigado mais barato o equipamento, ou seja, os equipamentos são mais caros de se instalar em áreas menores.

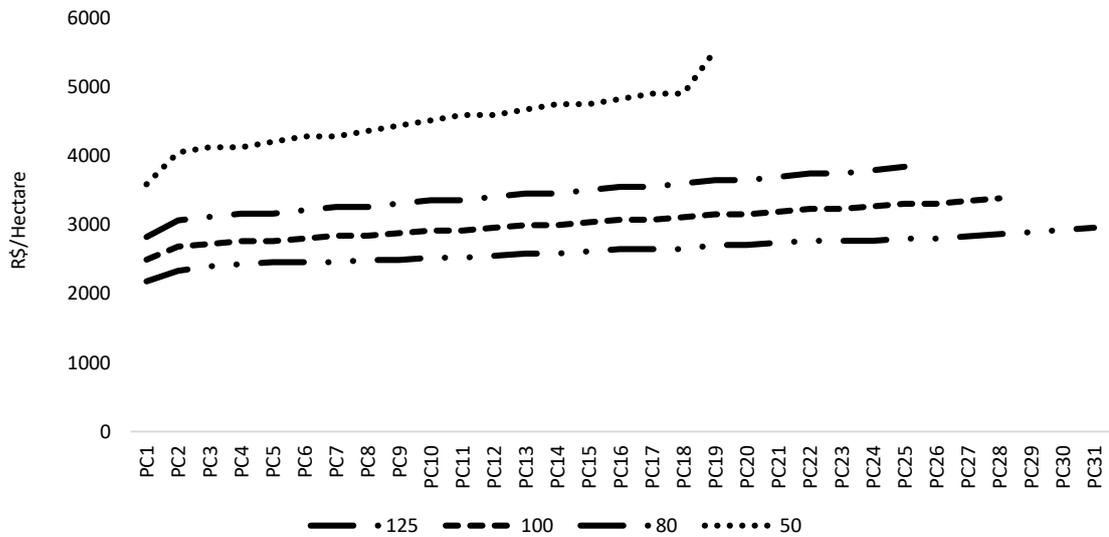


Figura 19- Custo do equipamento pivô central por hectare, áreas irrigadas com 125 ha, 100, 80 e 50 ha.

Segundo Andrade (2001) o custo por área tende a reduzir à medida em que se aumenta a área irrigada, ou seja, quando se aumenta o comprimento longitudinal da linha lateral.

## 4.2 Análise do Consumo de Energia Elétrica

Segundo Geisenhoff et al. (2018) os custos de implantação e operação têm aptidão a serem antagônicos: enquanto um aumenta, o outro diminui. Além disso, ocorrem em períodos de tempos diferentes, pois enquanto os custos de implantação ocorrem totalmente na instalação do sistema, os de operação ocorrem durante toda a vida útil e conforme o tempo de funcionamento. Quando se aumenta os diâmetros das tubulações de um sistema, os custos de implantação tendem a se elevar, entretanto, como as perdas de carga diminuem, os custos de operação são menores, devido à diminuição da potência do conjunto motobomba e consequentemente de energia elétrica (JIMÉNEZ-BELLO et al., 2015).

Nas tabelas 16, 17, 18 e 19 pode-se verificar a relação da perda de carga com a demanda e consumo de energia para Unai para as diferentes áreas irrigadas. Para os demais municípios e áreas, as tabelas podem ser observadas nos anexos.

Tabela 16- Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 50 ha em Unaí.

Combina- ções	hf (m)	Demanda (R\$)	106 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )		131 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )		Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)
			Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)	hf (m)	Demanda (R\$)		
PC1	4,70	149,88	10947,60	12011,39	6,95	202,14	14765,12	16199,87
PC2	1,20	128,68	9399,17	10312,49	1,78	163,37	11932,57	13092,07
PC3	1,21	128,74	9403,35	10317,09	1,80	163,47	11939,96	13100,18
PC4	2,29	135,26	9879,40	10839,39	3,39	175,39	12811,06	14055,93
PC5	0,64	125,25	9148,46	10037,43	0,94	157,08	11473,76	12588,67
PC6	1,23	128,82	9409,11	10323,41	1,81	163,61	11950,37	13111,60
PC7	2,20	134,71	9839,38	10795,49	3,25	174,39	12737,86	13975,61
PC8	0,65	125,30	9152,01	10041,32	0,96	157,18	11480,88	12596,49
PC9	1,27	129,07	9427,73	10343,83	1,88	164,08	11984,88	13149,47
PC10	2,11	134,16	9799,36	10751,58	3,12	173,39	12664,65	13895,28
PC11	0,66	125,40	9159,55	10049,59	0,98	157,36	11494,03	12610,91
PC12	1,35	129,58	9464,52	10384,20	2,00	165,00	12051,72	13222,80
PC13	2,02	133,61	9759,34	10707,67	2,98	172,39	12591,44	13814,96
PC14	0,69	125,55	9170,63	10061,75	1,02	157,64	11514,30	12633,15
PC15	1,48	130,36	9521,71	10446,94	2,19	166,44	12156,90	13338,20
PC16	1,93	133,06	9719,32	10663,76	2,85	171,38	12518,23	13734,64
PC17	0,72	125,76	9186,14	10078,77	1,07	158,04	11543,33	12665,01
PC18	1,66	131,45	9601,50	10534,49	2,46	168,44	12303,17	13498,68
PC19	1,84	132,52	9679,30	10619,85	2,72	170,38	12445,02	13654,32

\*Custo de energia total ao ano calculado de acordo com a equação 21.

Tabela 17 - Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 80 ha em Unai.

Combina- ções	hf (m)	Demanda (R\$)	170 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )		hf (m)	Demanda (R\$)	209 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	
			Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)			Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)
PC1	11,26	304,30	22226,76	24386,56	16,51	436,92	31913,35	35014,40
PC2	2,89	222,76	16270,68	17851,72	4,23	289,95	21178,95	23236,93
PC3	2,91	222,96	16285,86	17868,38	4,26	290,33	21206,33	23266,97
PC4	5,48	248,05	18117,91	19878,45	8,04	335,53	24508,14	26889,62
PC5	1,53	209,55	15306,21	16793,53	2,24	266,16	19440,81	21329,89
PC6	2,94	223,28	16308,61	17893,34	4,31	290,89	21247,41	23312,04
PC7	5,27	245,94	17963,97	19709,55	7,72	331,73	24230,71	26585,23
PC8	1,55	209,75	15320,43	16809,13	2,27	266,52	19467,03	21358,66
PC9	3,04	224,27	16381,13	17972,90	4,46	292,67	21377,64	23454,93
PC10	5,05	243,83	17810,04	19540,66	7,41	327,94	23953,27	26280,84
PC11	1,59	210,13	15348,15	16839,55	2,33	267,20	19516,85	21413,32
PC12	3,24	226,20	16521,89	18127,34	4,75	296,14	21631,10	23733,02
PC13	4,84	241,72	17656,10	19371,77	7,09	324,14	23675,84	25976,45
PC14	1,65	210,72	15391,52	16887,13	2,42	268,26	19594,64	21498,67
PC15	3,55	229,21	16742,28	18369,14	5,21	301,60	22029,66	24170,30
PC16	4,62	239,62	17502,17	19202,87	6,77	320,34	23398,41	25672,06
PC17	1,74	211,55	15451,95	16953,43	2,54	269,76	19703,89	21618,54
PC18	3,98	233,42	17049,40	18706,11	5,84	309,18	22582,91	24777,32
PC19	4,40	237,51	17348,23	19033,98	6,45	316,54	23120,98	25367,67
PC20	1,84	212,61	15529,44	17038,45	2,70	271,66	19842,86	21771,01
PC21	4,54	238,82	17443,96	19139,01	6,65	318,92	23294,36	25557,90
PC22	4,19	235,40	17194,30	18865,08	6,14	312,74	22843,54	25063,28
PC23	1,98	213,90	15623,99	17142,19	2,90	274,00	20013,29	21958,01
PC24	5,21	245,39	17923,83	19665,51	7,64	330,75	24158,77	26506,30
PC25	5,82	251,30	18355,21	20138,81	5,82	308,95	22566,11	24758,89
PC26	6,63	323,18	23605,89	25899,70	9,74	444,39	32459,40	35613,51
PC27	6,63	323,18	23605,89	25899,70	9,74	444,39	32459,40	35613,51
PC28	6,63	323,18	23605,89	25899,70	9,74	444,39	32459,40	35613,51

\*Custo de energia total ao ano calculado de acordo com a equação 21.

Tabela 18- Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 100 ha em Unai.

Combina- ções	212 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )				261 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )			
	hf (m)	Demanda (R\$)	Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)	hf (m)	Demanda (R\$)	Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)
PC1	17,0	448,5	32763,0	35946,6	24,9	671,2	49028,8	53793,0
PC2	4,3	295,5	21583,3	23680,6	6,4	394,3	28799,6	31598,1
PC3	4,4	295,9	21611,8	23711,8	6,4	395,0	28852,1	31655,7
PC4	8,3	343,0	25050,6	27484,8	12,1	480,2	35073,5	38481,7
PC5	2,3	270,7	19773,1	21694,4	3,4	349,4	25524,2	28004,4
PC6	4,4	296,5	21654,3	23758,5	6,5	396,1	28928,5	31739,6
PC7	7,9	339,0	24761,7	27167,8	11,7	473,0	34550,7	37908,0
PC8	2,3	271,1	19799,7	21723,6	3,4	350,1	25573,3	28058,3
PC9	4,6	298,3	21790,0	23907,4	6,7	399,4	29174,1	32009,0
PC10	7,6	335,0	24472,7	26850,7	11,2	465,9	34027,9	37334,4
PC11	2,4	271,8	19852,0	21781,0	3,5	351,4	25667,2	28161,3
PC12	4,9	301,9	22054,2	24197,2	7,2	406,0	29652,2	32533,5
PC13	7,3	331,1	24183,8	26533,7	10,7	458,7	33505,1	36760,8
PC14	2,5	272,9	19933,5	21870,5	3,7	353,4	25814,6	28323,0
PC15	5,3	307,6	22469,1	24652,5	7,9	416,2	30402,0	33356,2
PC16	7,0	327,1	23894,8	26216,7	10,2	451,5	32982,2	36187,1
PC17	2,6	274,5	20047,0	21995,0	3,8	356,2	26018,7	28546,9
PC18	6,0	315,5	23045,4	25284,7	8,8	430,5	31445,5	34501,1
PC19	6,6	323,2	23605,9	25899,7	9,7	444,4	32459,4	35613,5
PC20	2,8	276,4	20192,4	22154,5	4,1	359,8	26282,8	28836,7
PC21	6,8	325,7	23786,5	26097,9	10,0	448,9	32785,8	35971,7
PC22	6,3	319,2	23316,9	25582,7	9,3	437,2	31936,6	35039,9
PC23	3,0	278,9	20368,8	22348,1	4,4	364,2	26602,6	29187,6
PC24	7,8	338,0	24686,4	27085,2	11,5	471,2	34414,3	37758,4
PC25	6,0	315,3	23028,0	25265,7	8,8	430,1	31413,7	34466,3
PC26	3,2	281,7	20574,5	22573,8	4,7	369,3	26974,8	29596,0
PC27	9,0	352,3	25734,3	28235,0	13,3	497,1	36311,3	39839,7
PC28	5,6	311,3	22739,1	24948,6	8,3	422,9	30890,9	33892,6

\*Custo de energia total ao ano calculado de acordo com a equação 21.

Tabela 19- Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 125 ha em Unai.

Combinações	hf (m)	Demanda (R\$)	265 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )		326 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )		Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)
			Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)	hf (m)	Demanda (R\$)		
PC1	25,6	692,33	50569,17	55483,03	37,6	1075,42	78551,59	86184,53
PC2	6,57	403,10	29443,15	32304,18	9,64	553,22	40408,40	44334,92
PC3	6,62	403,85	29498,23	32364,61	9,71	554,56	40506,45	44442,51
PC4	12,4	492,80	35995,22	39492,91	18,3	715,18	52238,20	57314,24
PC5	3,48	356,27	26022,90	28551,57	5,11	468,69	34233,90	37560,44
PC6	6,69	404,94	29578,02	32452,15	9,82	556,54	40650,96	44601,06
PC7	11,9	485,32	35449,21	38893,85	17,5	701,68	51252,38	56232,63
PC8	3,53	356,97	26073,88	28607,50	5,18	469,92	34323,87	37659,16
PC9	6,92	408,45	29834,02	32733,02	10,1	562,89	41114,48	45109,62
PC10	11,5	477,85	34903,21	38294,79	16,8	688,18	50266,57	55151,02
PC11	3,62	358,30	26171,40	28714,50	5,31	472,34	34501,10	37853,61
PC12	7,37	415,28	30332,71	33280,18	10,8	575,22	42015,63	46098,33
PC13	11,0	470,37	34357,20	37695,73	16,1	674,69	49280,75	54069,41
PC14	3,76	360,41	26325,44	28883,51	5,51	476,15	34779,22	38158,75
PC15	8,08	426,00	31116,21	34139,81	11,8	594,58	43429,37	47649,45
PC16	10,5	462,90	33811,20	37096,67	15,4	661,19	48294,93	52987,80
PC17	3,95	363,34	26539,32	29118,18	5,79	481,43	35165,03	38582,06
PC18	9,06	440,92	32205,58	35335,03	13,3	621,51	45396,62	49807,86
PC19	10,0	455,42	33265,19	36497,60	14,7	647,69	47309,11	51906,19
PC20	4,20	367,10	26814,16	29419,72	6,16	488,23	35661,27	39126,52
PC21	10,3	460,08	33605,25	36870,70	15,1	656,11	47924,18	52581,03
PC22	9,52	447,95	32719,18	35898,54	13,9	634,20	46323,30	50824,58
PC23	4,50	371,69	27148,84	29786,92	6,60	496,50	36265,22	39789,15
PC24	11,8	483,37	35306,34	38737,10	17,4	698,17	50995,70	55951,01
PC25	9,03	440,47	32173,18	35299,48	13,2	620,70	45337,48	49742,97
PC26	4,85	377,01	27537,82	30213,70	7,12	506,11	36967,32	40559,47
PC27	13,6	510,50	37287,81	40911,11	20,0	747,12	54571,65	59874,43
PC28	8,54	433,00	31627,17	34700,42	12,5	607,20	44351,66	48661,36
PC29	5,24	383,00	27975,56	30693,97	19,0	729,34	53272,42	58448,96
PC30	15,6	541,01	39516,42	43356,27	22,9	802,22	58596,12	64289,96
PC31	8,05	425,52	31081,17	34101,36	11,8	593,71	43365,85	47579,75

\*Custo de energia total ao ano calculado de acordo com a equação 21.

Quanto mais elevada a perda de carga (PC1) maior será a demanda e consequentemente o consumo e o custo total de energia, o mesmo acontece com o contrário (PC2). Uma diferença em 74% de perda de carga chega a ocasionar um aumento de 14 a 48% no custo total de energia, em 50 a 125 ha.

### 4.3 Análise do Custo Fixo e Operacional

#### 4.3.1 Unai

As Figuras 21 a 28 mostram a relação dos diâmetros com os comprimentos da linha lateral do sistema de irrigação, os custos operacionais, fixos e totais para o município de Unai. Apresentando comprimentos diferentes de acordo com a área irrigada: 50 ha (399,0 m); 80 ha (504,89 m); 100ha (557,83 m) e 125 ha (610,77 m). Exibindo a combinação da simulação do pivô central com custo mais baixo para o custo mais elevado.

Cores	Diâmetro(mm)
Azul	254,000
Marinho	219,075
Amarelo	168,275

Figura 20- Relação das cores relacionadas com o diâmetro para facilitar o entendimento dos gráficos abaixo.

Podemos observar nas figuras 21 e 22 referentes a área irrigada de 50 hectares que para a simulação de menor vazão o custo inferior foi obtido pela combinação PC1, a qual foi dimensionada com 399 m de diâmetro único 6 5/8", já para a maior vazão a combinação PC18, houve uma variação de apenas R\$90,90 entre PC18 e o PC1. A simulação com custo total mais elevado foi referente ao PC2 para as duas vazões, um aumento em aproximadamente 19% de vazão acarretou um acréscimo em 6,82% no PC mais econômico.

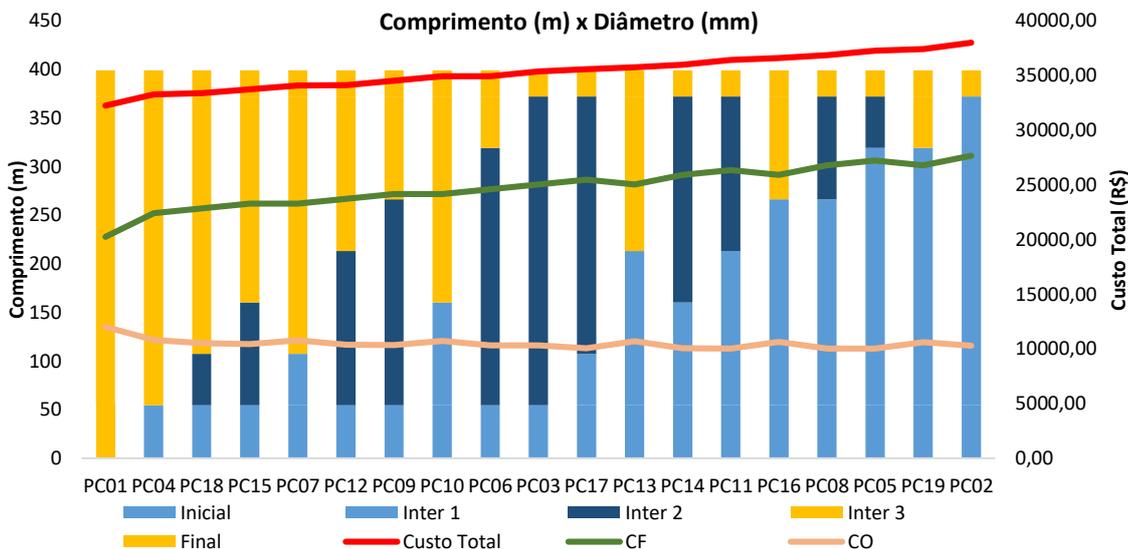


Figura 21- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 50 hectares com 106m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Unai.

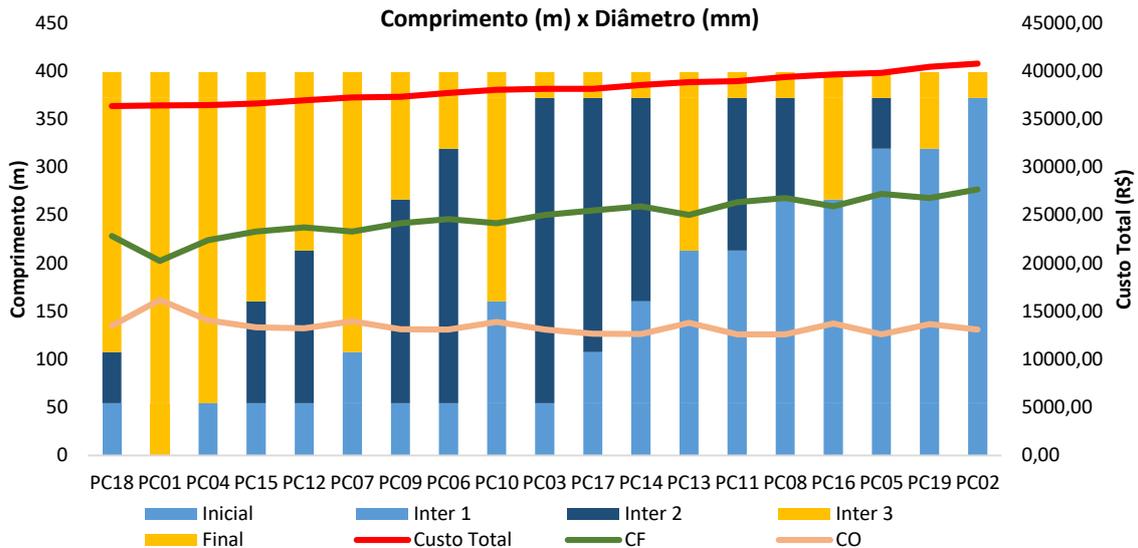


Figura 22- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 50 hectares com  $131\text{m}^3\text{h}^{-1}$  de vazão para o município de Unai.

Segundo Medeiros (2010) uma tubulação de diâmetro maior resultará em uma menor perda de carga, logo a altura manométrica e a potência do conjunto motobomba serão pequenas, reduzindo os custos operacionais, mas em contrapartida, para uma determinada vazão, quanto menor o diâmetro da tubulação, maior a perda de carga, propiciando um aumento da altura manométrica e consequentemente na potência consumida no bombeamento.

As figuras 23 e 24 apresentam as simulações realizadas em uma área irrigada de 80 hectares, podemos verificar a relação entre o custo variável, o qual reduz para as combinações dos diâmetros maiores devido ao aumento da perda de carga e consequentemente da potência requerida pelo conjunto motobomba e do custo fixo, o qual diminui com os diâmetros menores devido ao valor das tubulações serem mais baixos. Os custos totais variam em aproximadamente 12% para as duas vazões.

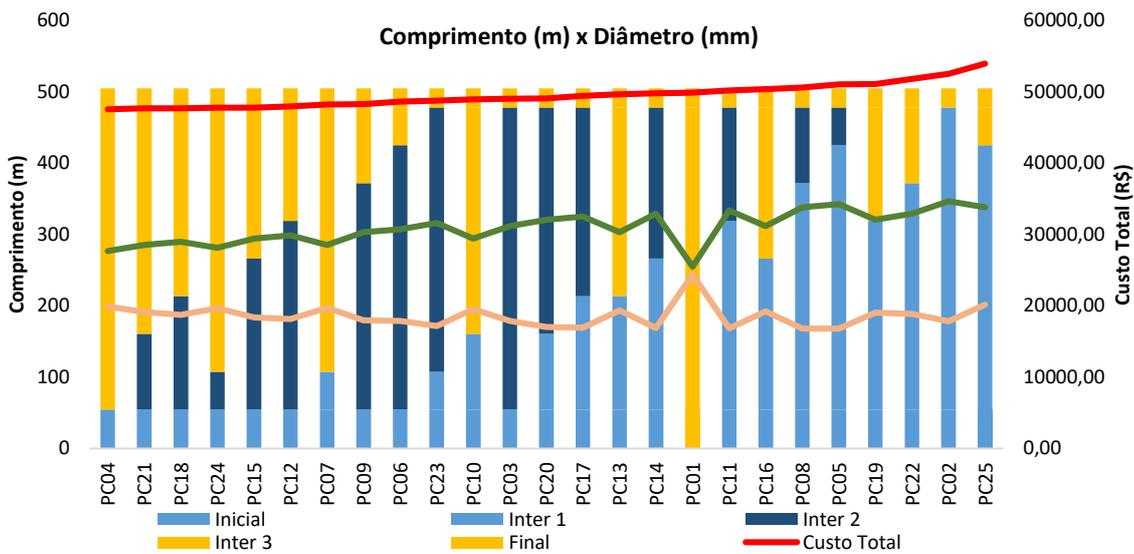


Figura 23- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 80 hectares com 170m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Unai.

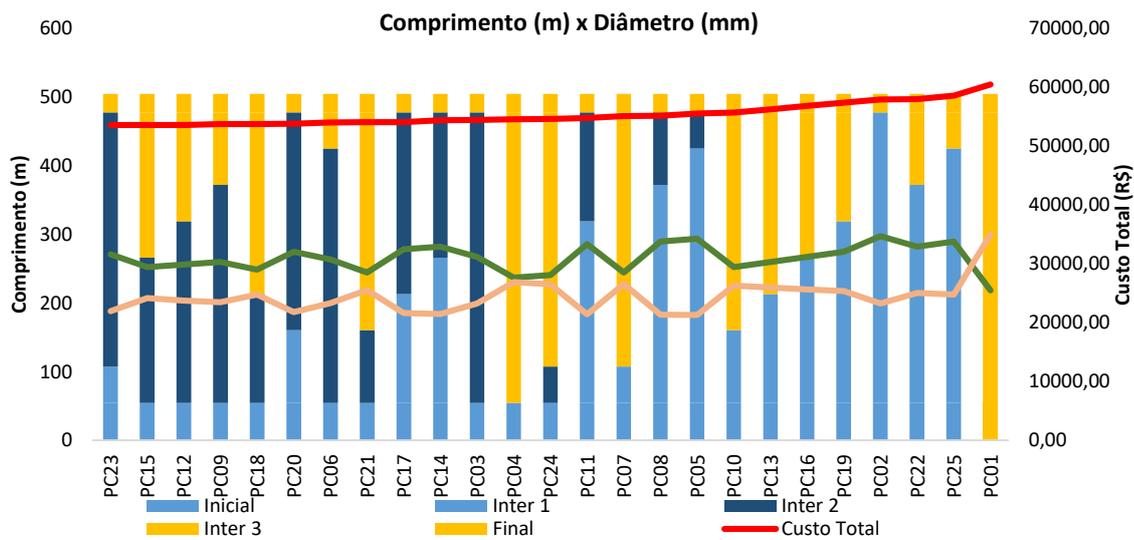


Figura 24- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 80 hectares com 209m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Unai.

Devido ao aumento da área irrigada, percebemos nas figuras 25 e 26 referentes à área de 100 ha que o PC1 se inviabilizada, devido ao alto custo variável sendo responsável por 43,9 e 34,5% do custo total, respectivamente.

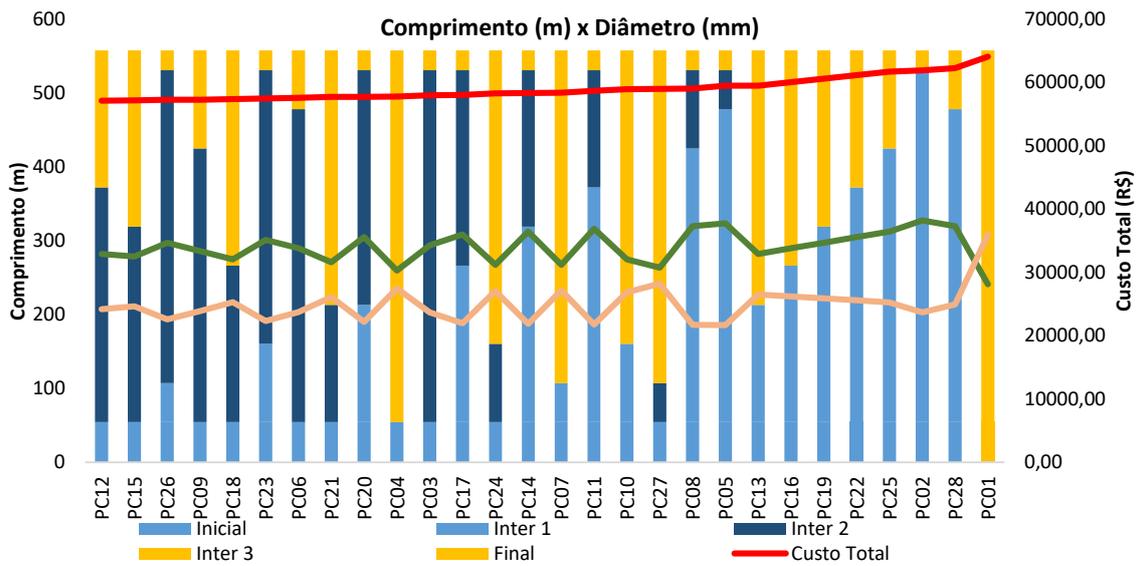


Figura 25- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 100 hectares com  $212\text{m}^3\text{h}^{-1}$  de vazão para o município de Unai.

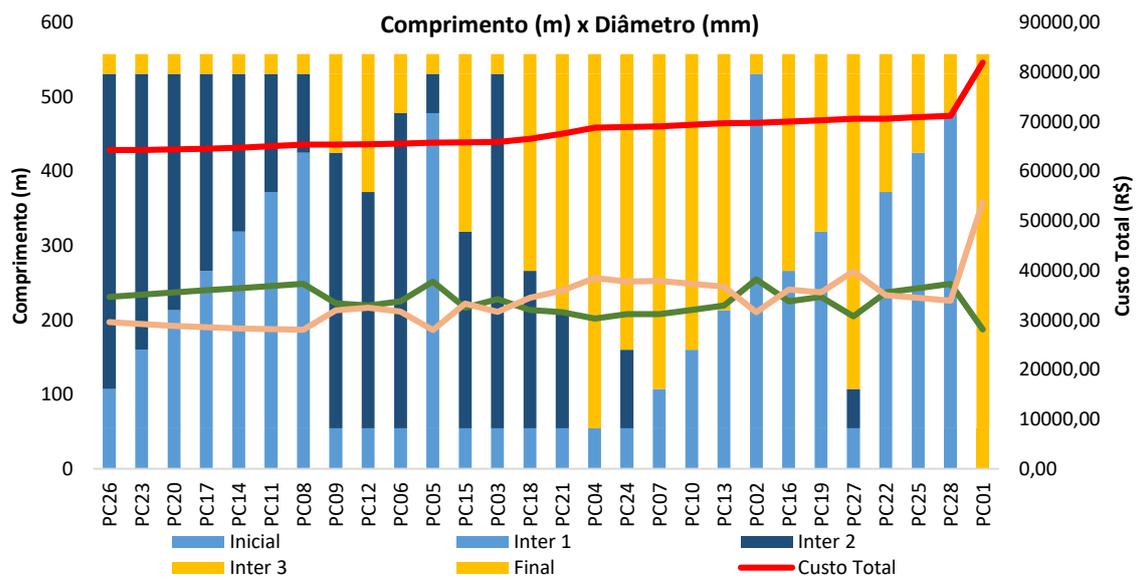


Figura 26- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 100 hectares com  $261\text{m}^3\text{h}^{-1}$  de vazão para o município de Unai.

Nas figuras 27 e 28 observamos a relação de custos para a área irrigada de 125 hectares, para áreas maiores, o custo total mais viável está relacionado com combinações de diâmetros maiores.

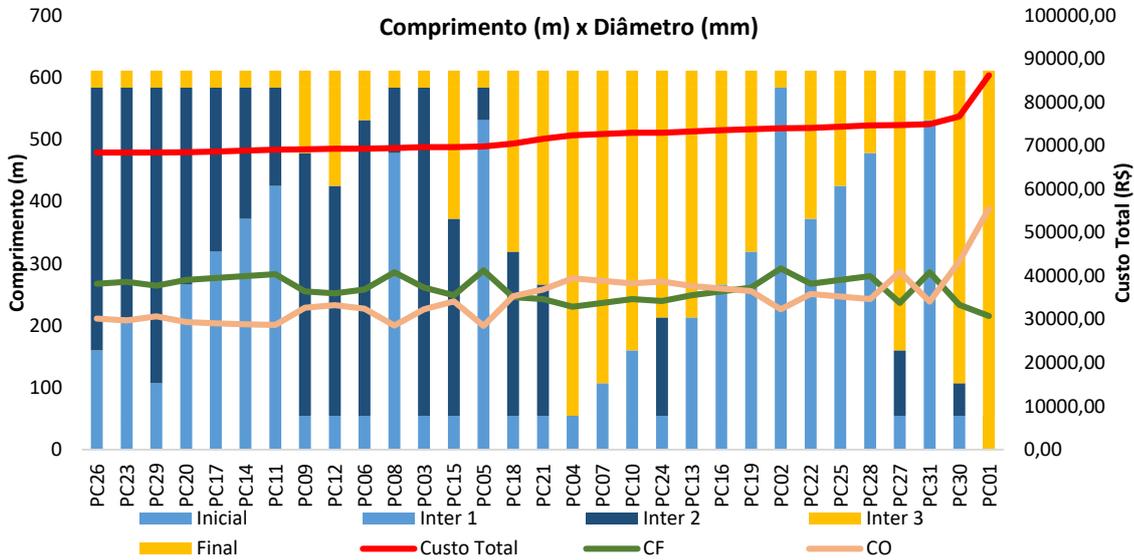


Figura 27- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 125 hectares com 265m³h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Unai.

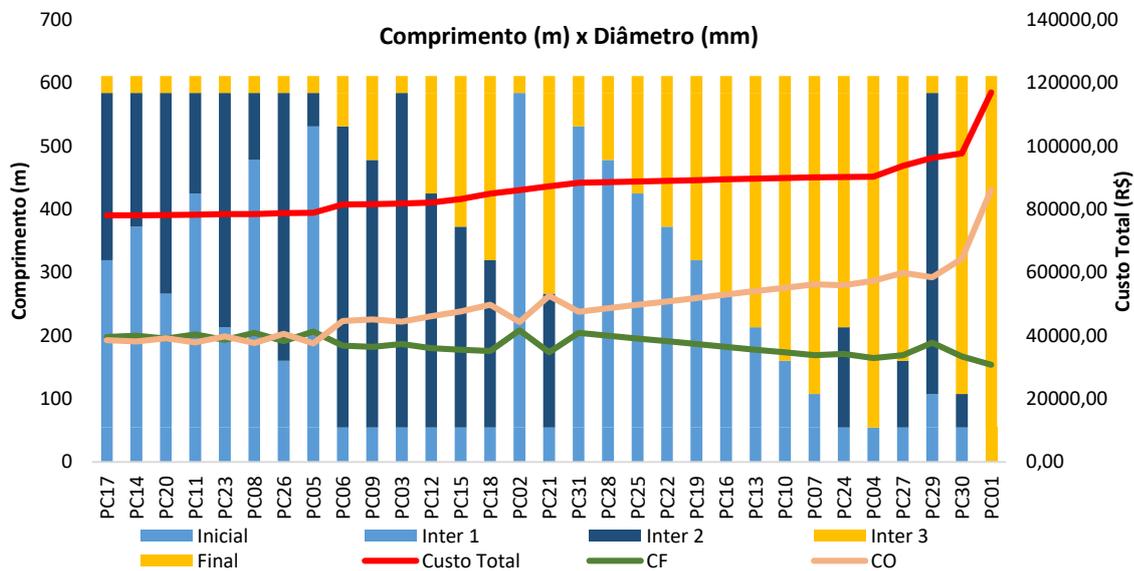


Figura 28- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 125 hectares com 326m³h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Unai.

Nas figuras 29 e 30 verificamos a relação entre o custo fixo e o custo operacional anual para a área irrigada de 125 hectares em Unaí, para as duas vazões em estudo, 265 e 326 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> respectivamente.

Podemos verificar dentre as combinações que as simulações quais apresentam custo operacional mais elevado estão relacionadas com as combinações dos diâmetros menores e reciprocamente. Um aumento em 18,7% da vazão ocasionou uma variação de 20,67 e 33,22% respectivamente na variação dos custos totais.

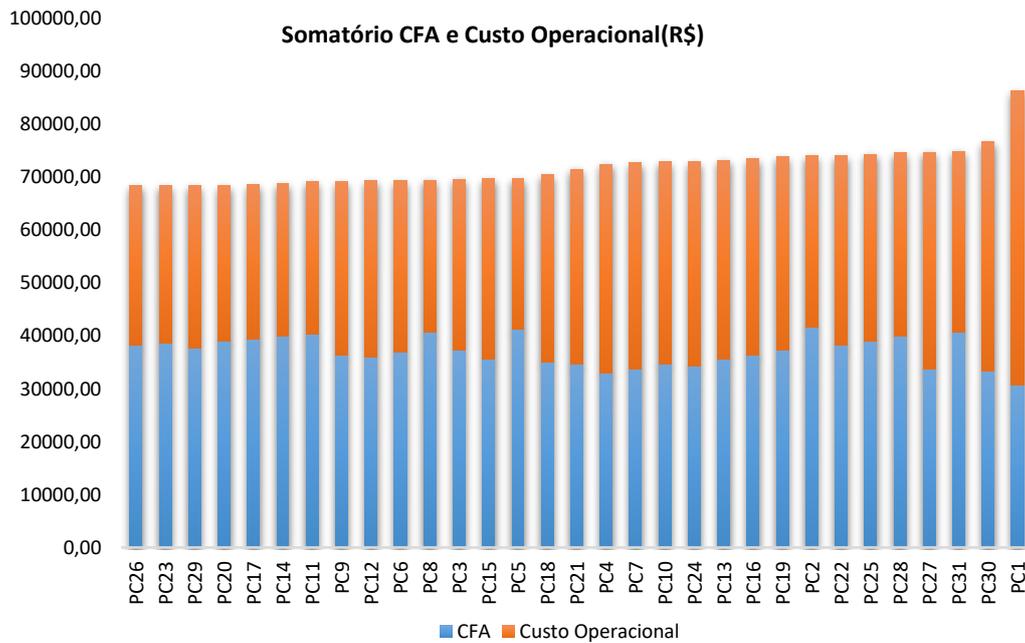


Figura 29- Relação dos custos fixos anuais e do custo operacional para a área irrigada de 125 ha e 265 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Unaí.

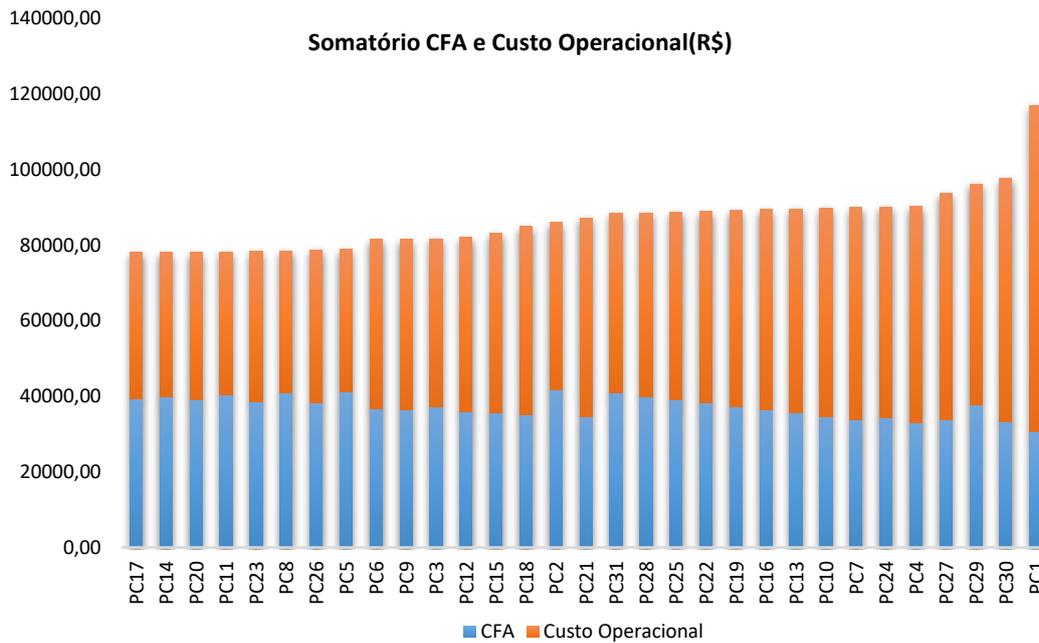


Figura 30- Relação dos custos fixos anuais e do custo operacional para a área irrigada de 125 ha e 326 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Unai.

Montero et al., (2013) desenvolveram uma metodologia para analisar os principais fatores que influenciam os custos anuais de aplicação de água em sistemas de irrigação por pivô central e determinar o sistema mais econômico, usando como variáveis o comprimento e diâmetro da linha lateral, tipo de aspersor, capacidade do equipamento, eficiência de aplicação e custos de água e energia elétrica na Espanha. Os resultados indicaram que para áreas irrigadas menores que 30 ha, o diâmetro recomendado da tubulação é 127,00 mm (5''); 30-40 ha, 168,3 mm (6 5/8''); 40-74 ha 219,10 mm (8 5/8'') e para áreas de 75-100 ha, 254 mm (10''). A capacidade do sistema e o custo energético não interferem fortemente no custo total.

#### 4.3.2 Luís Eduardo Magalhães

Medeiros (2010) verificou em seu trabalho os custos de implantação do equipamento de irrigação pivô central para diferentes combinações da linha lateral, constatando que o equipamento com o menor diâmetro tem seu custo fixo total R\$203.499,94 e como esperado, os custos crescem com o aumento do diâmetro da tubulação.

As figuras 31 a 38 nos mostram a relação entre os custos fixos, operacionais e custo total referente ao município de Luis Eduardo Magalhães para diferentes vazões e áreas irrigadas.

Como esperado, a combinação PC1 foi considerada a mais econômica para a menor vazão (Figura 31), para a vazão maior houve uma pequena variação entre o PC18 e PC1 de aproximadamente R\$911,00. Em casos que o custo total apresente uma baixa variação, recomenda-se escolher a simulação com menor peso total da tubulação, normalmente os diâmetros menores, evitando a patinação do equipamento.

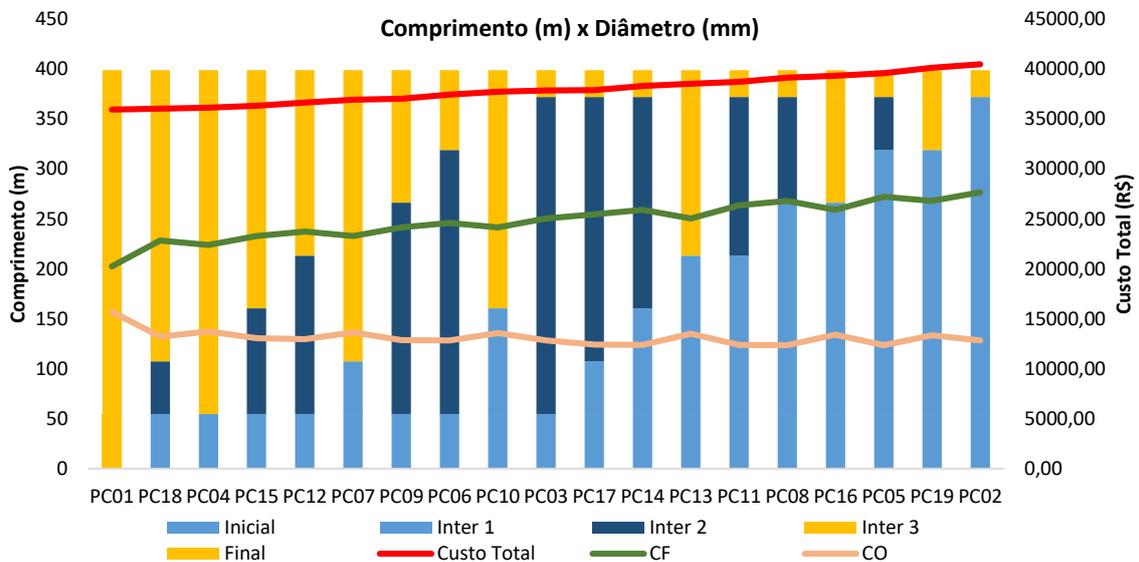


Figura 31- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 50 hectares com 127m³h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Luis Eduardo Magalhães.

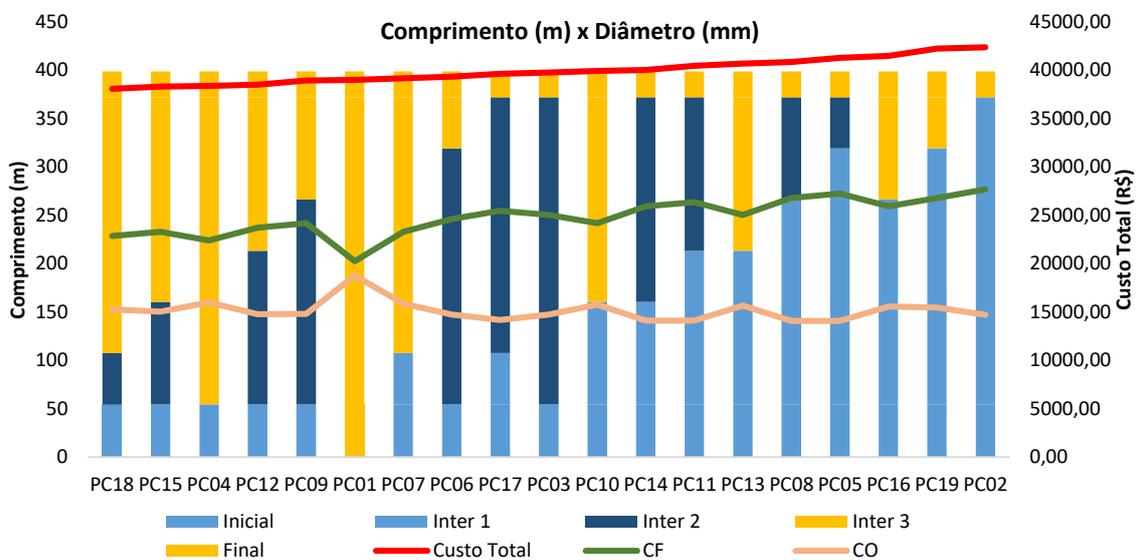


Figura 32- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 50 hectares com 143m³h para o município de Luis Eduardo Magalhães.

Ao aumentar a área, a perda de carga referente ao uso de menores tubulações acresce o custo operacional, se tornando normalmente os mais altos em relação às combinações, inviabilizando os custos (Figura 33 e 34).

Com o aumento da vazão em aproximadamente 11% a combinação mais rentável transfere-se do PC15 ao PC23, devido ao aumento das tubulações com maiores diâmetros, ou seja, custo fixo. O PC1 se mantém o mais caro devido ao estreitamento da tubulação e conseqüentemente aumento do custo variável.

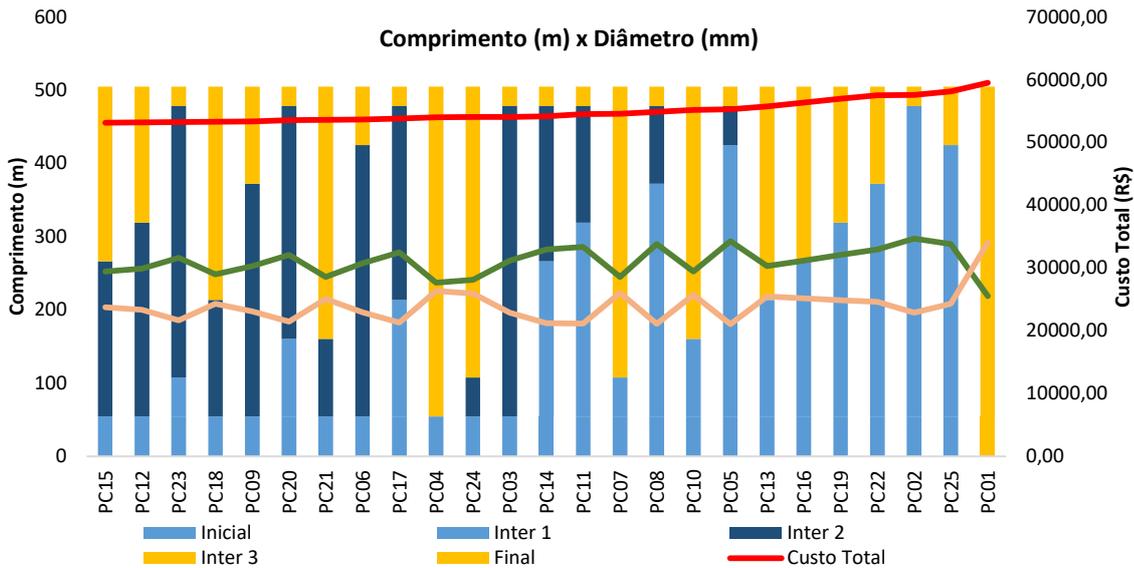


Figura 33- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 80 hectares com  $204 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$  de vazão para o município de Luis Eduardo Magalhães.

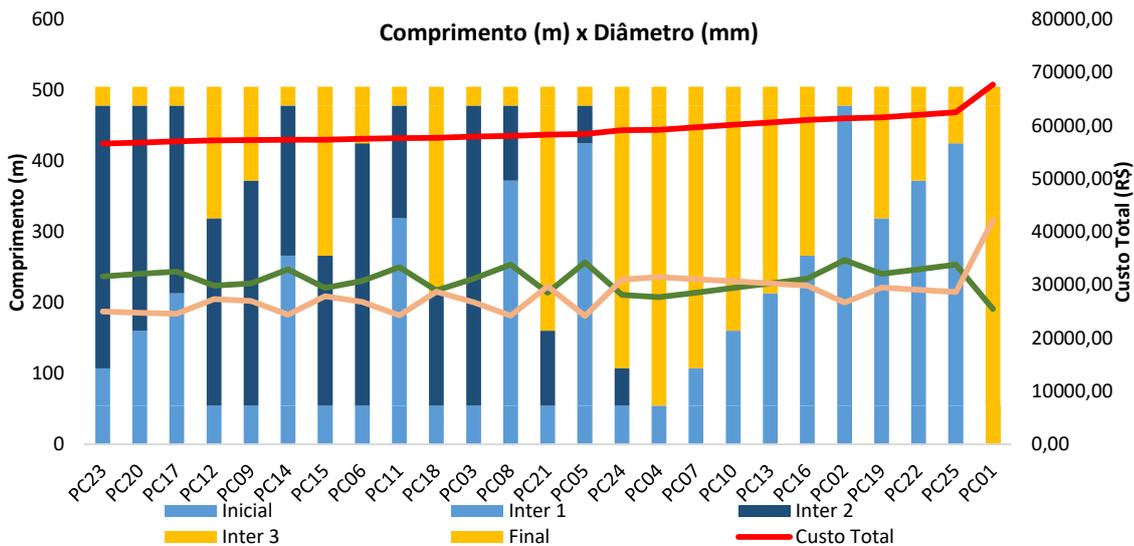


Figura 34- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 80 hectares com  $229 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$  de vazão para o município de Luis Eduardo Magalhães.

Aumentando a área em 20 ha, podemos visualizar que o PC1 ainda se mantém a combinação com o custo total mais elevado, devido ao aumento abrupto do custo operacional, apresentando em 65 e 70% respectivamente dos custos totais. Há uma queda do custo operacional nas combinações PC5 (Figura 35) e PC2 (Figura 36), devido ao aumento do comprimento da tubulação da linha lateral, consequentemente uma menor potência requerida ao conjunto motobomba, diminuindo o consumo energético.

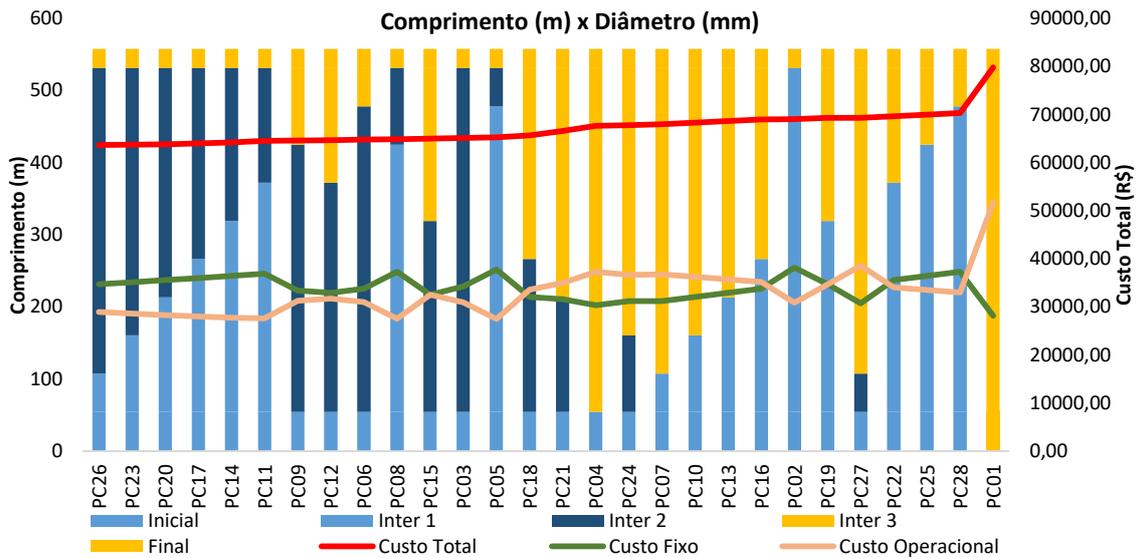


Figura 35- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 100 hectares com 254 m³h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Luis Eduardo Magalhães.

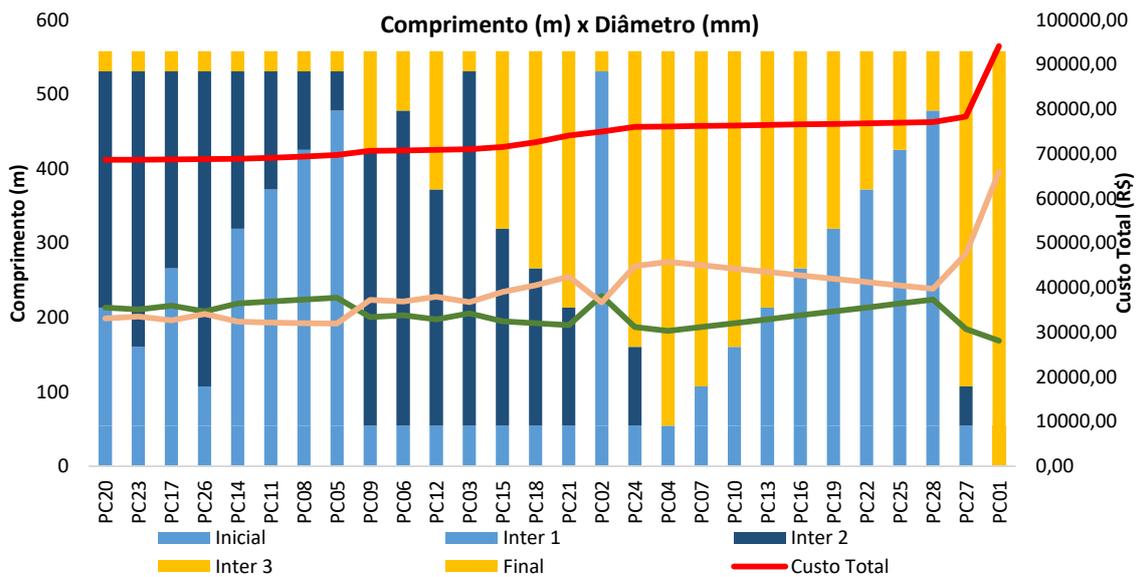


Figura 36- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 100 hectares com 286 m³h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Luis Eduardo Magalhães.

Para áreas maiores, a combinação entre os custos fixos e variáveis são mais rentáveis para as tubulações maiores e o PC1 se mantém o mais elevado, como esperado.

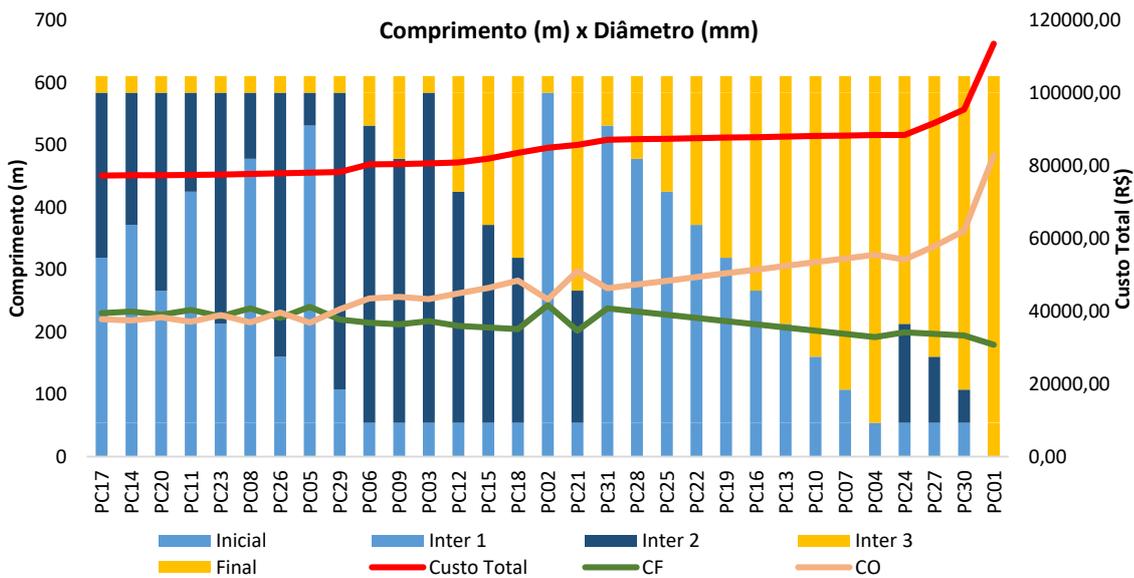


Figura 37- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 125 hectares com 318 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Luis Eduardo Magalhães.

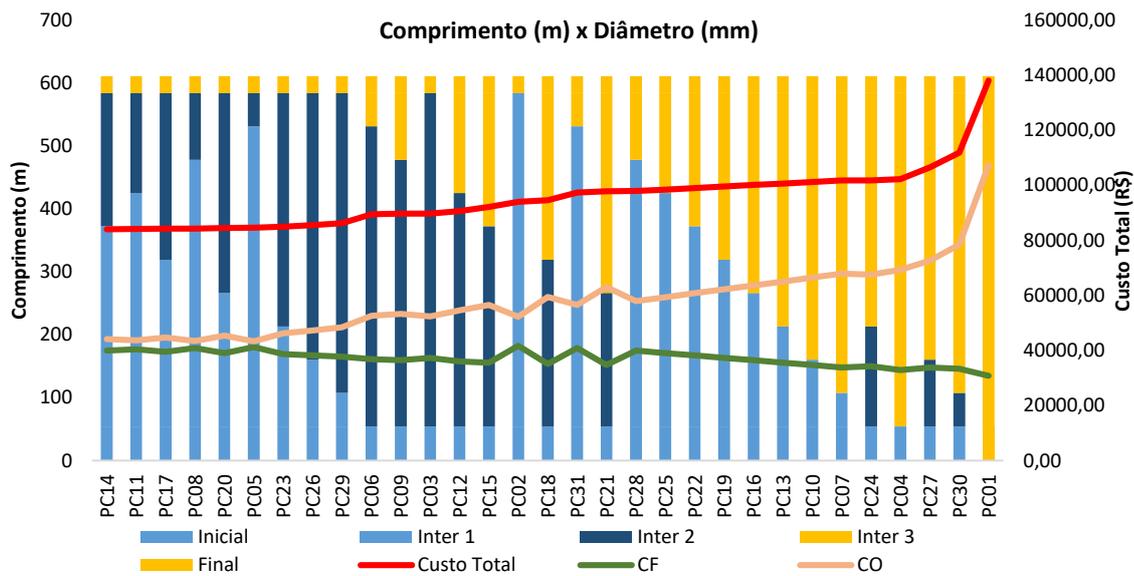


Figura 38- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 125 hectares com 357 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Luis Eduardo Magalhães.

Nas figuras 39 e 40 verificamos a relação entre o custo fixo e o custo operacional anual para a área irrigada de 125 hectares em Luis Eduardo Magalhães, para as duas vazões em estudo, 318 e 357 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> respectivamente.

Dentre as 31 combinações as simulações que apresentam um custo fixo mais elevado estão relacionados com as combinações das tubulações com maiores diâmetros e reciprocamente. Um aumento em aproximadamente 11% da vazão ocasionou uma variação de 31,92 e 39,10% respectivamente na variação dos custos totais (Figura 39 e 40).

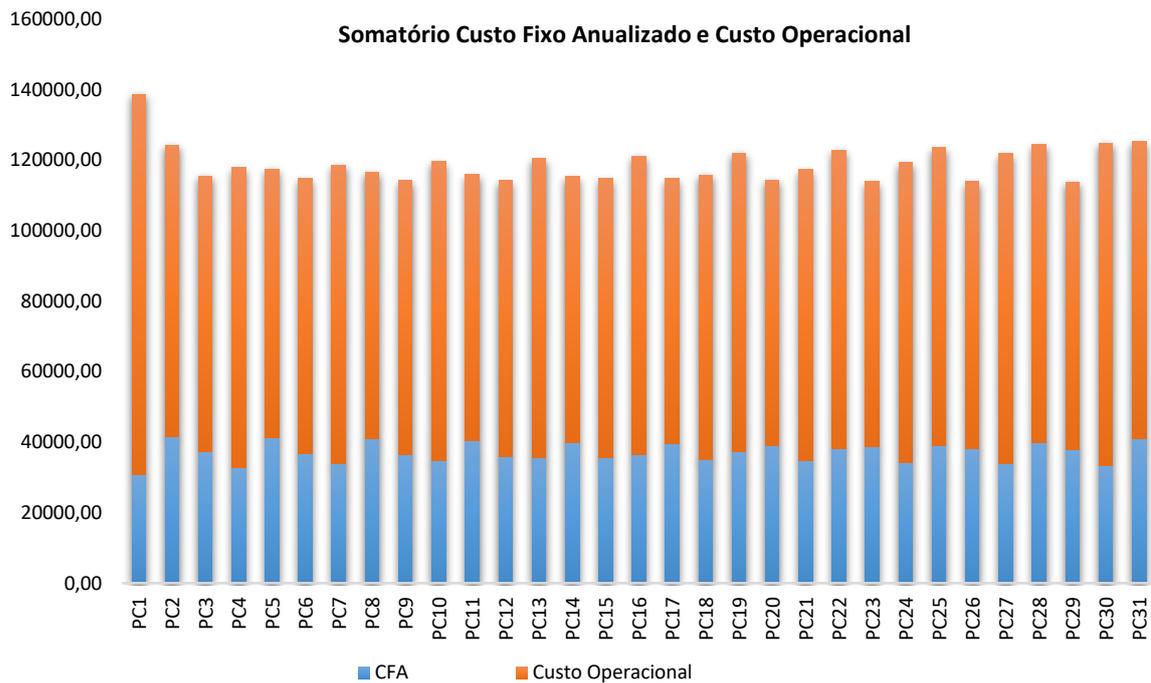


Figura 39- Relação do custo total com o porcentagem dos custos operacional e fixo para a área irrigada de 125 ha e 318 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Luis Eduardo Magalhães.

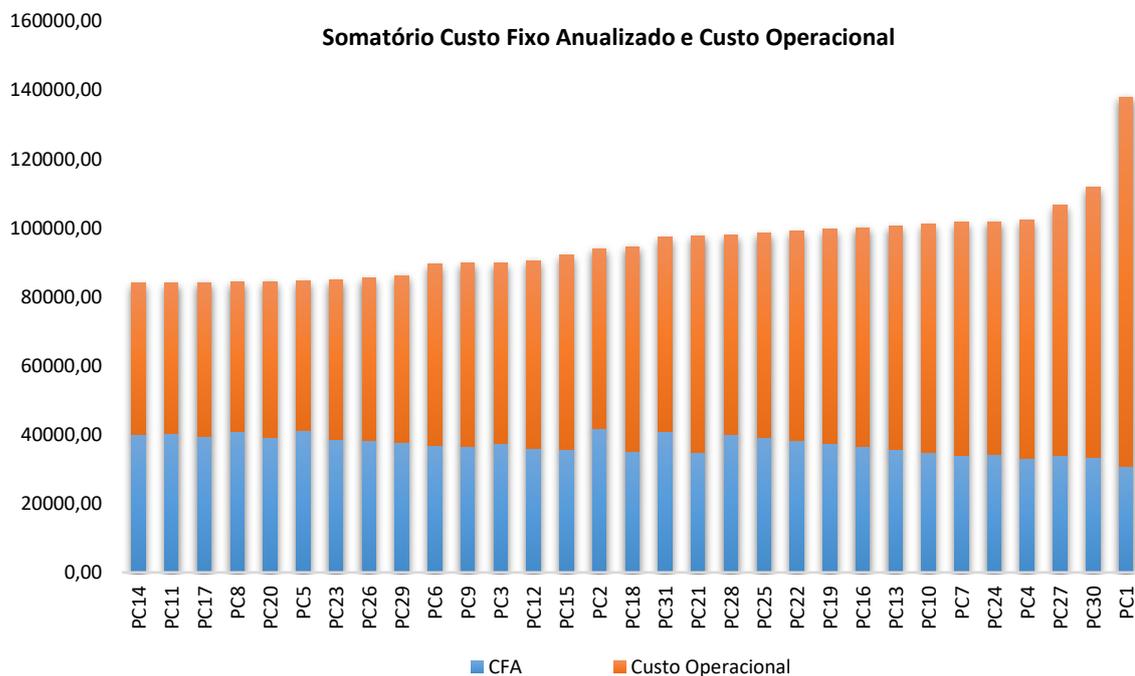


Figura 40- Relação do custo total com o porcentagem dos custos operacional e fixo para a área irrigada de 125 ha e 357 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Luis Eduardo Magalhães.

Segundo Bonomo (2000) para equipamentos pivô central, os custos totais apresentam mais amenos com o aumento da área irrigada, devido a redução do custo de investimento e a redução dos custos de energia elétrica, havendo também um aumento devido ao acréscimo da lâmina de irrigação, em função do aumento do número anual de irrigação.

### 4.3.3 Cristalina

Moreno et al., (2012) desenvolveram uma metodologia, a qual otimiza as curvas características, eficiência da bomba e o diâmetro da tubulação, além de variáveis hidrológicas, do solo, variáveis hidráulicas e econômicas para determinar o custo mínimo total de aplicação de água (custos fixos e operacionais) em sistemas pivô central, O DOP (Optimal Pivot Design). Resultados recomendam o uso de diâmetros maiores de tubulação e evitar períodos de irrigação com altos custos, além de reduzir o tempo de uso de 20-22 para 18 horas  $\text{dia}^{-1}$  e aumentar a capacidade do sistema de 1,2-1,3 para 1,5 litros  $\text{segundo}^{-1}\text{ha}^{-1}$ .

As figuras 41 a 48 nos mostra a relação dos diâmetros com os comprimentos da linha lateral do sistema de irrigação, os custos operacionais, fixos e totais para o município de Cristalina.

Verificamos na figura 42, que o PC1 não se manteve o mais barato como esperado, verificando a diferença do custo total entre os 4 primeiros itens, podemos observar que o custo se manteve próximo, variando de R\$37.228,02 a R\$37.751,72.

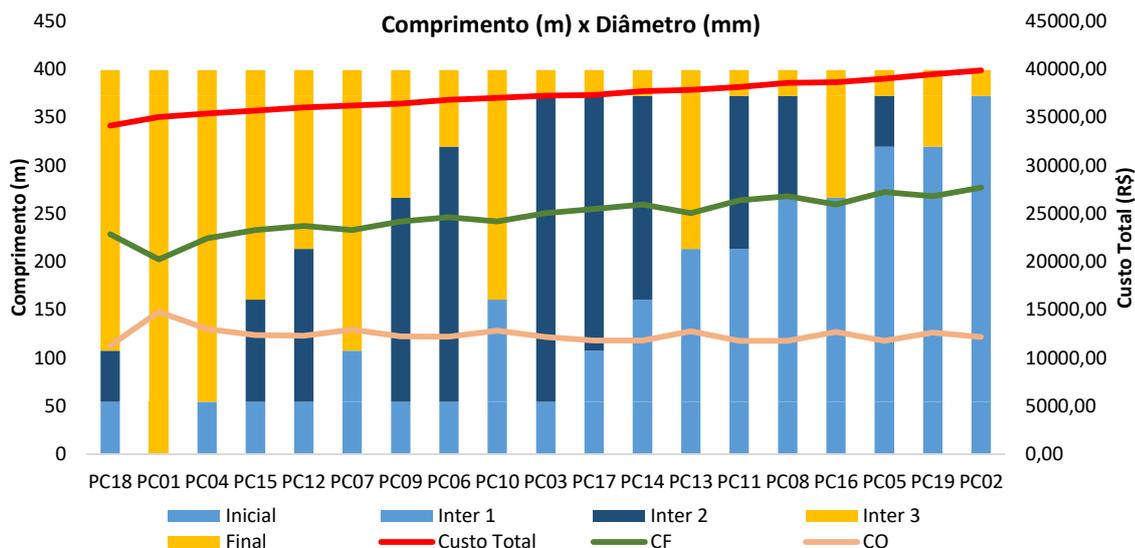


Figura 41- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 50 hectares com  $123 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$  de vazão para o município de Cristalina.

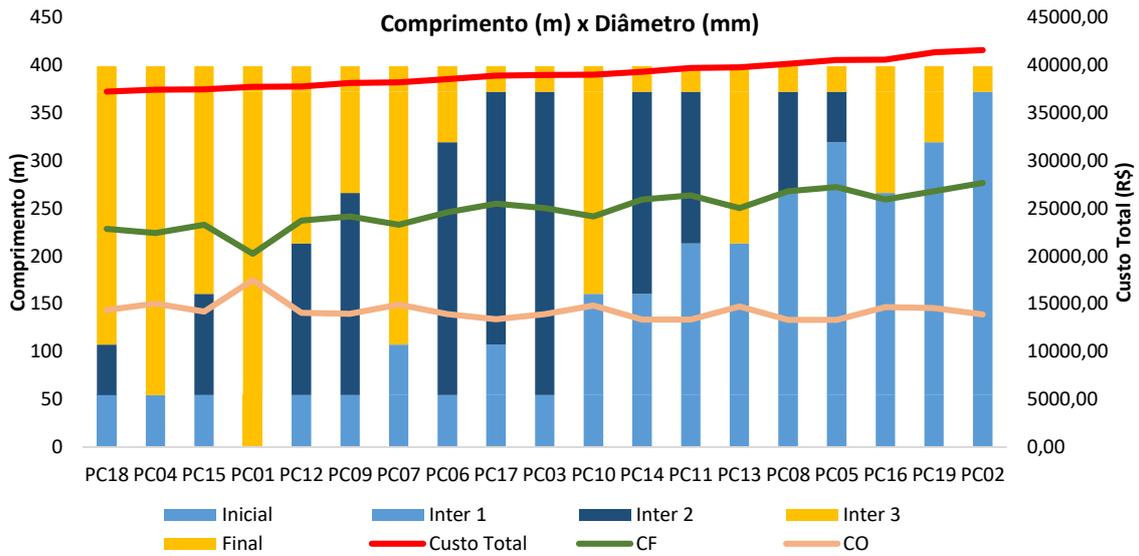


Figura 42- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 50 hectares com 138 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Cristalina.

Um aumento em 10,86% na vazão para a área irrigada de 80 ha, causou uma diferença em custos totais da tubulação da linha lateral em 9,18 e 14,28% respectivamente (Figura 43 e 44).

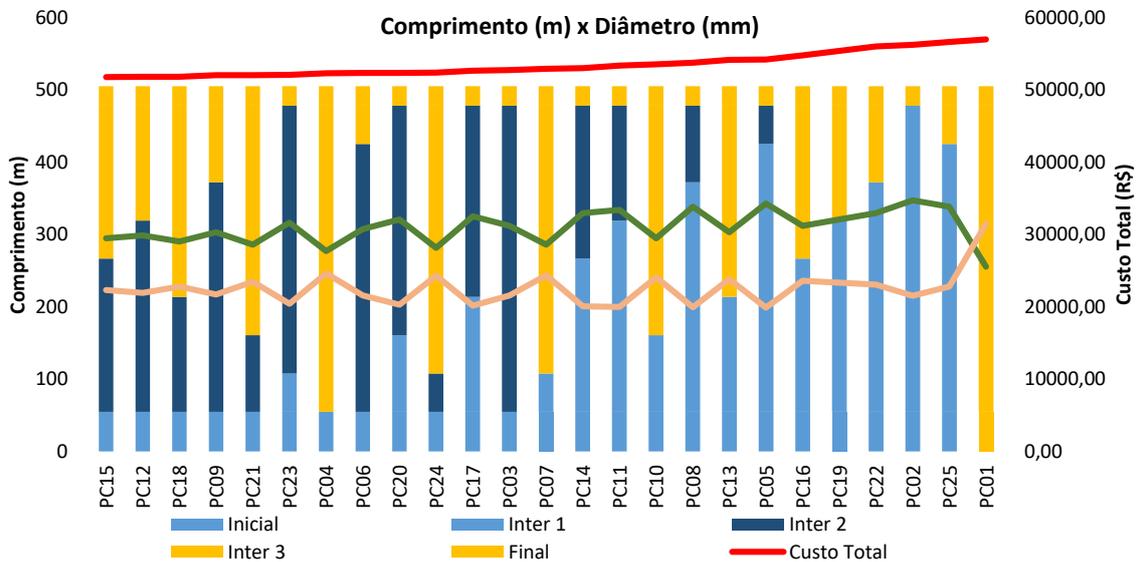


Figura 43- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 80 hectares com 197 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Cristalina.

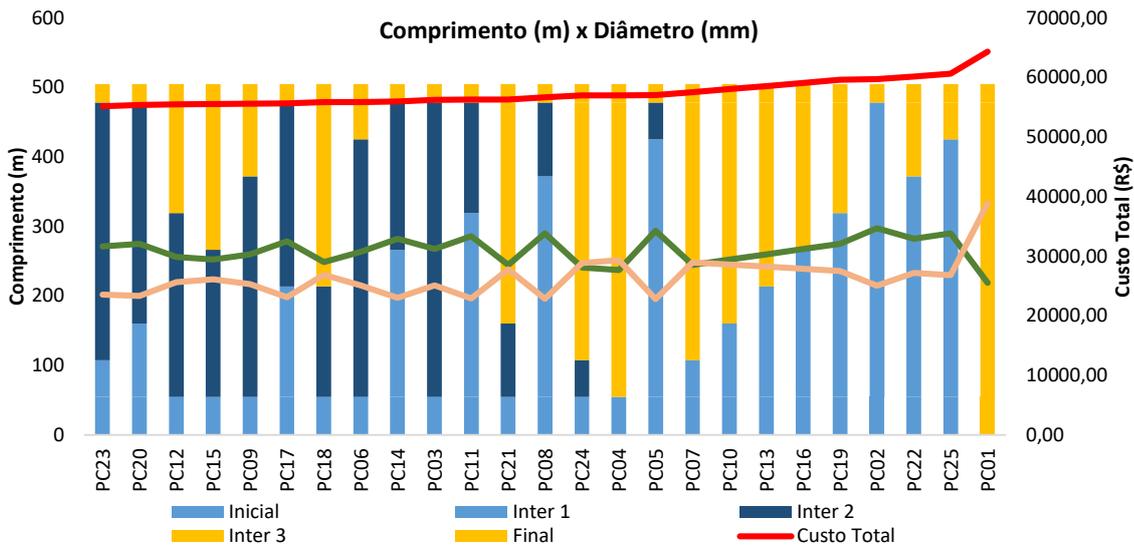


Figura 44- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 80 hectares com 221 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Cristalina.

Com o aumento do comprimento referente ao menor diâmetro da tubulação, o custo operacional cresceu bruscamente e o fixo decresceu, afirmando o comportamento esperado, aumenta-se a perda de carga e conseqüentemente o custo operacional e devido à utilização de menores diâmetros, o custo fixo se mantém baixo.

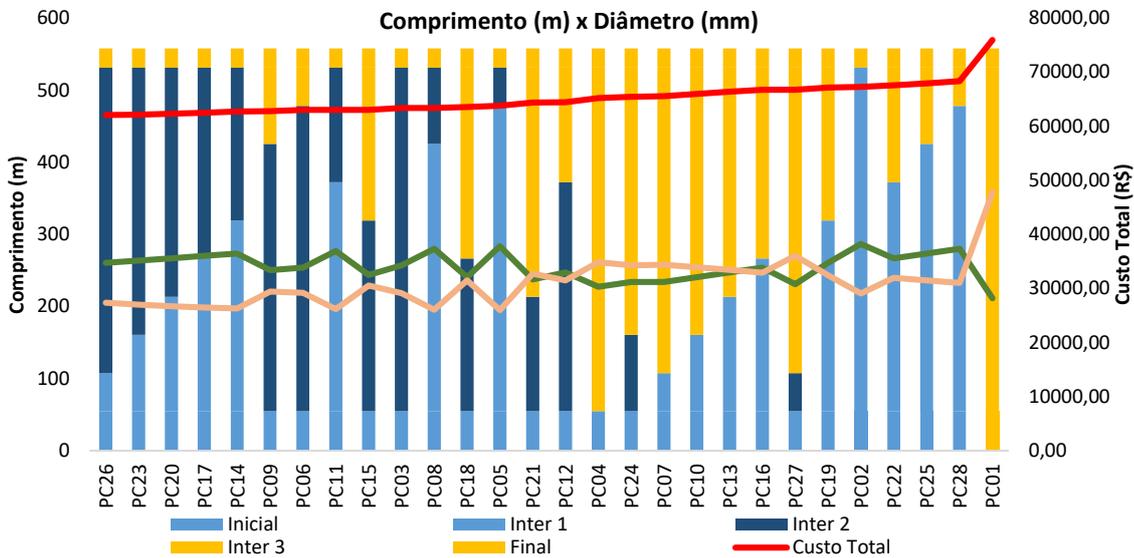


Figura 45- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 100 hectares com 246 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Cristalina.

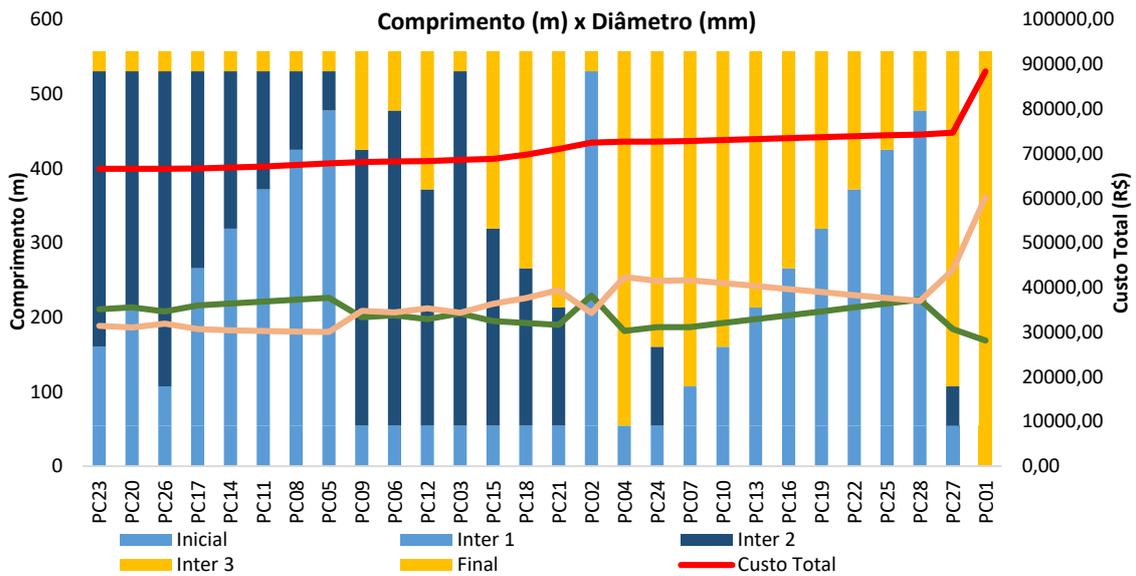


Figura 46- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 100 hectares com 276 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Cristalina.

Verificamos nos gráficos referentes à área irrigada de 125 ha que as combinações se mantêm com uma baixa variação, até o aumento do comprimento com diâmetro inferior, ocasionando um acréscimo do custo operacional e consequentemente queda do custo fixo.

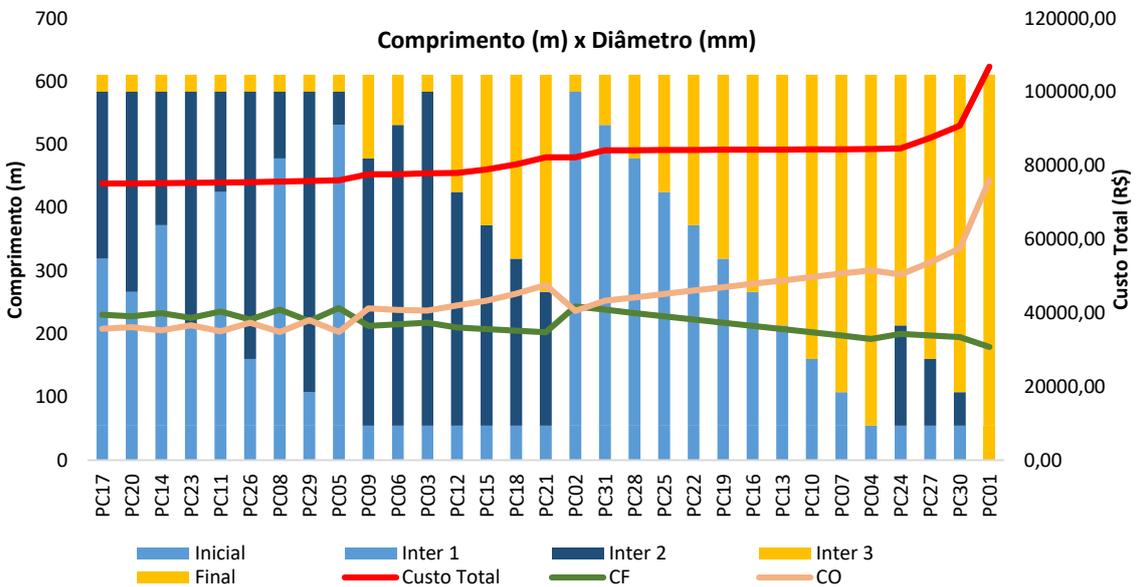


Figura 47- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 125 hectares com 308 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Cristalina.

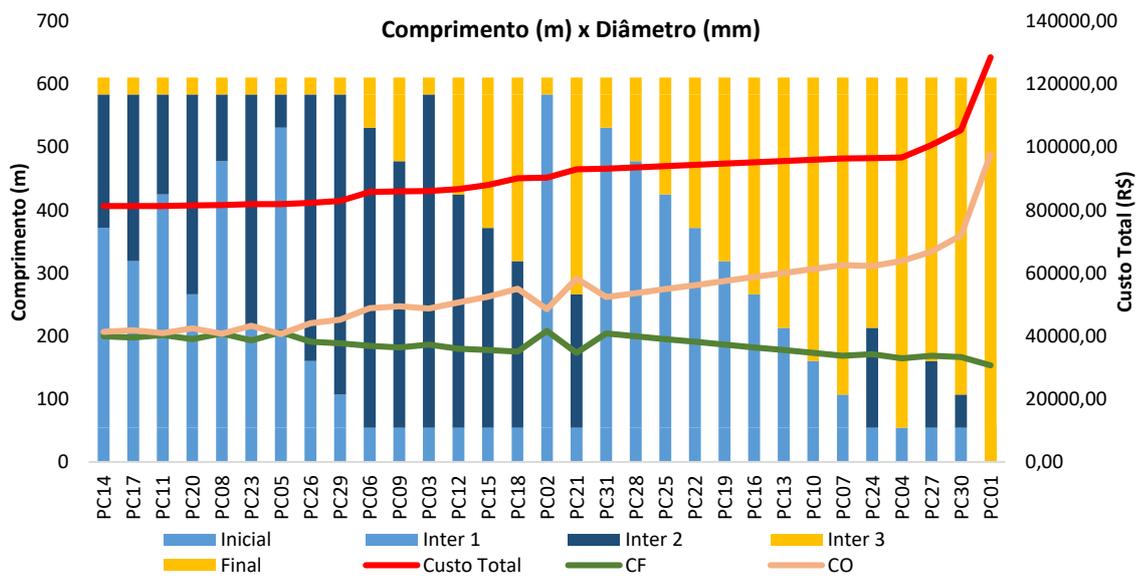


Figura 48- Relação dos diâmetros com o comprimento da linha lateral, custos fixos, operacionais e totais para a área irrigada de 125 hectares com  $345 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$  de vazão para o município de Cristalina.

Nas figuras 49 e 50 verificamos a relação entre o custo fixo e o custo operacional anual para a área irrigada de 125 hectares no município de Cristalina, para as duas vazões em estudo,  $308$  e  $354 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$  respectivamente.

Um aumento em aproximadamente 13% da vazão ocasionou uma variação de 29,69 e 36,75% respectivamente na variação dos custos totais (Figura 49 e 50).

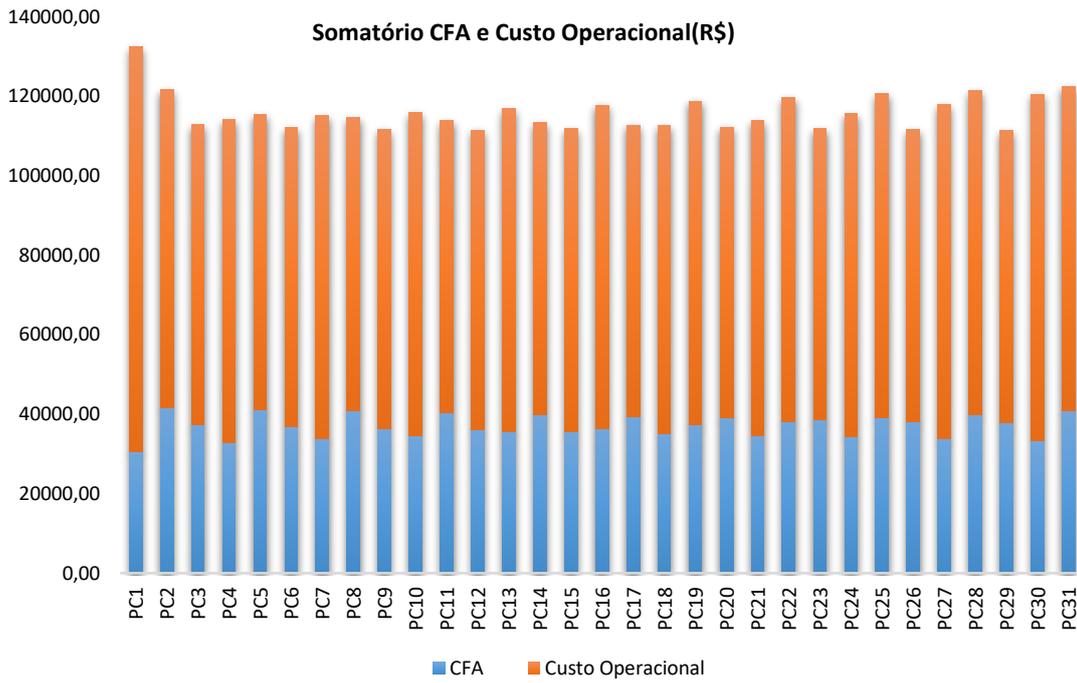


Figura 49- Relação do custo total com o porcentagem dos custos operacional e fixo para a área irrigada de 125 ha e 308 m³h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Cristalina.

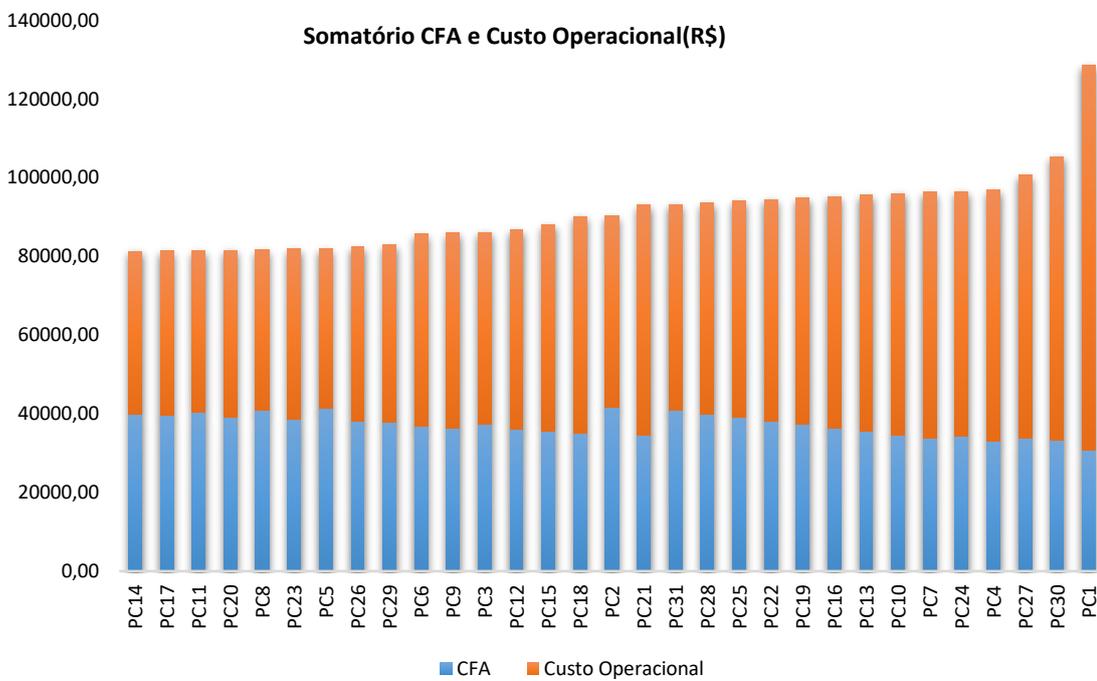


Figura 50 Relação do custo total com o porcentagem dos custos operacional e fixo para a área irrigada de 125 ha e 345 m³h<sup>-1</sup> de vazão para o município de Cristalina.

Toledo et al. (2019) avaliaram a viabilidade econômica-financeira com base no tempo de retorno do investimento (ROI) em 4 anos máximos, de dois sistemas de irrigação pivô central já implantados em Goiás, comparando as características do dimensionamento existente com a simulação de um dimensionamento otimizado. Ambos equipamentos apresentaram superdimensionamento, contudo apresentaram viabilidade para otimização, com base na substituição parcial e redução da potência necessária ao conjunto motobomba, promovendo uma redução do custo com energia elétrica.

Segundo Kopp et al. (2016) o estudo do design da tubulação para o sistema de irrigação é de grande importância, pois o superdimensionamento da tubulação pode elevar a velocidade e perdas de carga, o que implica em um aumento de potência absorvida pela bomba para transpor a taxa de fluxo no ponto do pivô. Por sua vez, resulta em um superdimensionamento do motor elétrico, induzindo a uma redução na eficiência do uso da energia, visto que o carregamento abaixo de 75% da potência nominal, requer mais energia elétrica para produção da mesma energia mecânica.

## 5- CONCLUSÕES

A proposta do trabalho foi o dimensionamento econômico do equipamento pivô central telescópico, com variados comprimentos e diâmetros de tubulações, obtendo uma diversidade de combinações. A análise do sistema ótimo ajudou na escolha do sistema mais econômico, permitindo a otimização do sistema pivô central, considerando jornadas de trabalho e vazões diferentes.

Devido às simulações dos equipamentos pivô central terem sido dimensionadas para os mesmos diâmetros (mudando apenas o comprimento de acordo com a área), o comportamento da perda de carga foi semelhante para todo o estudo, o qual aumenta de acordo com o aumento da vazão e o estreitamento da tubulação. Quanto mais elevada a perda de carga (PC1) maior será a demanda de energia elétrica e consequentemente o consumo e o custo total de energia, o mesmo acontece com o contrário. Uma diferença em 74% de perda de carga chega a ocasionar um aumento de 14 a 48% em custo total de energia, em 50 a 125 ha.

A diferença dos custos por região não foram significativos, os maiores custos operacionais foram referentes à Luís Eduardo Magalhães, a qual apresenta uma porcentagem de desconto especial para irrigantes em 10% a mais que as demais regiões, mas em compensação o custo do consumo de energia apresenta um acréscimo em aproximadamente 34% das demais.

As combinações referentes aos vãos com diâmetros menores proporcionam um custo inferior para aquisição do sistema (custo fixo), mas consequentemente as perdas de cargas são maiores, requisitando uma maior potência no conjunto motobomba, propiciando um maior consumo de energia (custo operacional) e vice versa.

Para áreas irrigadas de 50 ha, 2 em 6 combinações do equipamento PC1, a qual apresenta 100% da tubulação de diâmetro 6 5/8" tem o custo total mais acessível, já para as maiores áreas (125 ha), 100% da mesma combinação apresentou como custo mais alto, devido elevado custo operacional.

O 23 foi considerado mais barato para os dimensionamentos das maiores vazões em áreas irrigadas de 80ha, apresentando aproximadamente 63% da linha lateral com diâmetro 6 5/8".

Para área irrigada de 100ha o PC26 foi considerado o equipamento mais barato em 50% dos dimensionamentos, o qual apresenta 76% do diâmetro 8 5/8".

O PC17 foi considerado como o equipamento mais acessível para a maior área irrigada, apresentando 86,7% da tubulação com diâmetro de 8 5/8".

No estudo, diversas combinações de comprimentos e diâmetros de tubos aéreos, apresentaram custo total anual muito próximos; nestes casos recomenda-se uma análise do peso da tubulação da linha lateral (pressão do rodado sobre o solo), evitando o risco de trilhas profundas e de patinamento do pivô central em solos de menor resistência à compactação do rodado (ex: solos cambissois e vertissois).



## REFERÊNCIAS

ABIMAQ. A história das máquinas. Disponível em: <http://www.abimaq.org.br/arquivos/html/publicacoes/a-historia-das-maquinas>. Acesso 16 abr. 2018.

ABIMAQ. Área Irrigada no Brasil cresce 3,45%. Disponível em: <http://www.abimaq.org.br/site.aspx/detalhes-imprensa-ultimos-releases?codNoticia=56p7vjbdz2I=>. Acesso 25 de maio. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, ANEEL. Resolução Nº 456, de 29 de novembro de 2000. Brasília, 2000. 75 p. Disponível em: <[www.aneel.gov.br/cedoc/res2000456.pdf](http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2000456.pdf)>. Acesso em: 20 dez. 2018.

ALAZBA, A. A. et al. Field assessment of friction head loss and friction correction factor equations. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 138, n. 2, p. 166-176, 2011.

ALAZBA, A.A.; MATTAR, M.A.; ELNESR, M.N.; AMIN, M.T. Field assessment of friction head loss and friction correction factor equations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, V. 167, 2012.

ALLEN, Richard G. et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **Fao, Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

ALLEN, R. G.; KELLER, J.; MARTIN, D. Irrigation association: center pivot design. 2. ed. Saint Joseph: ASAE, 2011. 304 p.

ALVES JÚNIOR, J.; SALES, D. L. A.; PEREIRA, R. M.; RODRIGUEZ, W. D. M.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P. Viabilidade econômica da irrigação por pivô central nas culturas de soja, milho e tomate. *Pesquisa Agropecuária Pernambucana*, 22, 2017. DOI:10.12661/pap.2017.011.

ALMEIDA, Alex Nunes de. **Dimensionamento do sistema de Irrigação por Gotejamento Móvel (IRGMO): metodologia de cálculo e software**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Conjuntura dos recursos hídricos: Informe 2016. Brasília: ANA, 2016. 95 p.

Agência Nacional de Águas (Brasil). Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil / Agência Nacional de Águas, Embrapa Milho e Sorgo. - 2. ed. - Brasília: ANA, 2019. 47 p.: il. ISBN: 978-85-8210-060-8.

ANA; EMBRAPA MILHO E SORGO. Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil - ano 2014. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/metadados/>> e <<http://www.snirh.gov.br>>. Acesso em 15/09/2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS- ANA. Atlas da Irrigação: Uso da água na agricultura irrigada, edição 2018.

ANDRADE, C. L. T. de. Circular técnica: seleção do sistema de irrigação. Sete Lagoas. v. 14, n. 1, dez. 2001.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução normativa no 479, de 3 de abril de 2012. Disponível em: <[www.aneel.org.br](http://www.aneel.org.br)> Acessos: janeiro de 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, ANEEL. Resolução normativa Nº 207, de 9 de janeiro de 2006. Brasília, 2006. 3 p. Disponível em: <[www.aneel.gov.br/cedoc/ren2006207.pdf](http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2006207.pdf)>. Acesso em: 20 dez. 2008.

ARTIOLI, Felipe; BELONI, Tatiane. Diagnóstico do perfil do usuário de Drones no Agronegócio Brasileiro. **Revista iPecege**, v. 2, n. 3, p. 40-56, 2016.

BAPTISTA, MARCIO BENEDITO.; MARCIA MARIA LARA PINTO COELHO. fundamentos de engenharia hidráulica- 3 ed., 2 reimpressão, Ver. E ampl. –Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. 473 p.

BARBOSA, B. D. S.; COLOMBO, A.; SOUZA, J. G. N.; BAPTISTA, V. B. S.; ARAÚJO, A. C. S. Energy efficiency of a center pivot irrigation system. *Engenharia Agrícola*, v. 38, n. 2, p. 284-292, 2018. DOI:10.1590/1809-4430-eng.agric.v38n2p284-292/2018.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. Manual de irrigação. 8.ed. Viçosa. Ed: UFV, 2006. 625 p.

BONOMO, Robson; MANTOVANI, Everardo Chartuni; CAIXETA, Glória Zélia Teixeira. Comparação de custos para diferentes sistemas de irrigação empregados na cafeicultura irrigada em áreas de cerrado em Minas Gerais. 2000.

BOYER, C. N.; LARSON, J. A.; ROBERTS, R. K.; McCLURE, A. T.; TYLER, D. D. The impact of field size and energy cost on the profitability of supplemental corn irrigation. *Agricultural Systems*, v. 127, p.61-69, 2014. DOI:10.1016/j.agsy.2014.01.001.

CARVALHO, J. A.; OLIVEIRA, L. F. C. Instalações de bombeamento para irrigação: hidráulica e consumo de energia. Lavras, UFLA, 2008. 354 p.

CHRISTIANSEN, J.E. Irrigation by sprinkling. Berkeley: University of California, 1942. 124 p. (Bulletin, 670).

CHRISTOFIDIS, DEMETRIOS; GORETTI, GUSTAVO DOS SANTOS- 2019 Cenários da agricultura irrigada no Brasil. *Revista ITEM Irrigação & Tecnologia Moderna*, Brasília, Nº 118/119, 2019.

CHU, S. T.; MOE, D. L. Hydraulics of a center pivot system. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Saint Joseph, v. 15, n. 5, p. 894-896, 1972.

CNA Brasil, 2019. Esclarecimentos relativos aos efeitos do Decreto no 9.642/2018 que alterou os descontos das contas elétricas do setor rural. Disponível em: < <https://www.cnabrasil.org.br/boletins-tecnicos/esclarecimentos-relativos-aos-efeitos-do-decreto-no-9-462-2018-que-alterou-os-descontos-das-contas-eletricas-do-setor-rural>> . Acesso em: 20 de junho de 2019.

COELHO, RUBENS DUARTE- 2019 Irrigação Digital: aplicativos iOS e Android para o manejo da irrigação. Revista ITEM Irrigação & Tecnologia Moderna, Brasília, Nº 118/119, 2019.

CRAIG, J. PMDI: Precision Mobile Drip Irrigation. Disponível em: <<http://www.depts.ttu.edu/tawc/documents/2015FD/PMDI.pdf>> Acesso em: 19 jan. 2019.

COLOMBO, Alberto. Pivô central. **IRRIGAÇÃO: Engenharia Agrícola Irrigação**. Editores: Jarbas Honório de Miranda, Regina Célia de Matos. Piracicaba: FUNEP. 2003. SBEA. Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola. Volume 2. pag. 209-258.

COSTA, J. de O.; COELHO, R. D.; ALMEIDA, A. N.; FARÍAS, A. J.; MONTEIRO, R. O. C. Energia elétrica e irrigação no Brasil: impacto das bandeiras tarifárias. p. 110–113, 2017. Revista Item.

CUNHA, Denis Antonio; COELHO, Alexandre Bragança; FÉRES, José Gustavo. Irrigation as an adaptive strategy to climate change: an economic perspective on Brazilian agriculture. **Environment and Development Economics**, v. 20, n. 1, p. 57-79, 2015.

DECHMI, Farida et al. Analysis of an irrigation district in northeastern Spain: II. Irrigation evaluation, simulation and scheduling. **Agricultural Water Management**, v. 61, n. 2, p. 93-109, 2003.

DIRETORIA, D. E.; DE ABASTECIMENTO, SUPERINTENDÊNCIA. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Brasília: ANEEL**, 2016.

EPIFANIO TOLEDO, Cristian et al. VIABILIDADE ECONÔMICA-FINANCEIRA DA OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO TIPO PIVÔ CENTRAL. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, v. 13, n. 1, 2019.

FAO, Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura, 2015. Disponível em:<[http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues\\_papers/HLEF2050\\_Global\\_Agriculture.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/HLEF2050_Global_Agriculture.pdf)>. Acesso em: out.2015.

FRIZZONE, J., REZENDE, R., PIRES DE CAMARGO, A. E COLOMBO, A. (2019). Irrigação por aspersão: SISTEMA PIVÔ CENTRAL. 1 ed. Piracicaba: Editora da Universidade Estadual de Maringá, p.149-157.

GEISENHOF, L. O.; FLORES, D. M.; GOMES FILHO, R. R.; SANTOS, R. C.; JORDAN, R. A.; OLIVEIRA, L. C. Irrigar – Aplicativo computacional para o dimensionamento econômico de sistemas de irrigação por aspersão convencional. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v.12, nº.4, p. 2761 – 2775, 2018. DOI:10.7127/rbai.v12n400972.

GOMES, Heber Pimentel. **Sistemas de Abastecimento de Água: Dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórias**. Editora Universitária-UFPB, 2004.

GUIMARAES, D. P.; LANDAU, E. C. Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil em 2013. **Embrapa Milho e Sorgo-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2014.

JIMÉNEZ-BELLO, M. A.; ROYUELA, A.; MANZANO, J.; GARCÍA-PRATS, A.; MARTÍNEZ-ALZAMORA, F.. Methodology to improve water and energy use by proper irrigation scheduling in pressurised networks. *Agricultural Water Management*. v. 149, fev. 2015, p. 91-101. doi: 10.1016/j.agwat.2014.10.026.

KÖPP, L.M.; PEITER, M.X.; ROBAINA, A.D.; TOESCHER, C.F.: “Caracterização de estações de bombeamento em lavouras de arroz do rio grande do sul”, *Engenharia Agrícola*, 36(2): 342-351, 2016, ISSN: 0100-6916, DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n2p342-351/2016.

MARTIN, D.; KINCAID, D.; LYLE, W. M. Design and operation of sprinkler systems. In: HOFFMAN, G. J. et al. **Design and operation of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASABE, 2007. Cap.16, p.557-631.

MEDEIROS, Antonio Marcos de Melo. Optimization of system center pivot sprinkler irrigation. 2010. 132 f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

MIRANDA, Eugenio Paceli de. Programa computacional para dimensionamento e determinação dos custos de energia elétrica de um sistema de irrigação localizada. 2016.

MONTERO, J. et al. Analysis of water application costs with a centre pivot system for irrigation of crops in Spain. **Irrigation Science**, v. 31, n. 3, p. 507-521, 2013.

MORAES, M. J.; FILHO, D. O.; MANTOVANI, E. C.; MONTEIRO, P. M. B.; MENDES, A. L. C.; DAMIÃO, J. H. A. C. Automação em sistema de irrigação tipo pivô central para economia de energia elétrica. *Revista Engenharia Agrícola*, v.34, n.6, p.1075-1088. 2014. DOI:10.1590/S0100- 69162014000600005.

MORENO, M. A. et al. Energy efficiency of pressurised irrigation networks managed on-demand and under a rotation schedule. **Biosystems engineering**, v. 107, n. 4, p. 349-363, 2010.

MORENO, M. A. et al. Optimal design of center pivot systems with water supplied from wells. **Agricultural water management**, v. 107, p. 112-121, 2012.

NASCIMENTO, Andressa Fernanda do; PIZAIA, Marcia Goncalves; CAMARA, Marcia Regina Gabardo da. **Fontes de financiamento da agricultura brasileira**. 2007. XLV Congresso da SOBER, Londrina, PR- 22 a 25 de julho de 2007.

PAIR, Claude H. et al. **Sprinkler irrigation**. Sprinkler Irrigation Assn., 1975.

Pair, C. H., W. H. Hinz, K. R. Frost, R. E. Sneed, and J. Schiltz. 1983. *Irrigation*, 5th Ed. Arlington, Va.: The Irrigation Association.

PEREIRA, L.S.; ALLEN, R.G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*, v. 147, p. 4–20, 2015a. DOI: 10.1016/j.agwat.2014.07.031.

PERRONI, B. L. T.; CARVALHO, J. D. a.; FARIA, L. C. Velocidade Econômica de Escoamento e Custos de Energia de Bombeamento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n.3, p. 487–496, jun. 2011.

PROCEL, ELETROBRAS. Manual de tarifação de energia elétrica. **Rio de Janeiro**, 2011.

PROGRAMA NACIONAL DE IRRIGAÇÃO, PRONI. Tempo de irrigar: manual do irrigante. São Paulo: Mater (Fundação Victor Civita), 1987. 160 p.

QUEIROZ, Tadeu Miranda de. **Desenvolvimento de um sistema automático para irrigação de precisão em pivô central**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

RODRIGUES, Lineu Neiva. **Modelo para dimensionamento e para simulação do desempenho de pivô central**. 1999. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa.

Scaloppi, E. J., & Allen, R. G. (1993). Hydraulics of center-pivot laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.119. no.3, p.554-567, 1993..

SILVA, R. R.; SANTOS, I. M. S.; OLIVEIRA, G. M.; CARVALHO, A. R. P.; SANTOS JÚNIOR, P. P.; GONÇALVES, I. S. Evapotranspiração e coeficiente de cultura para melancia. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v.9, n.6, p.392 - 399, 2015. DOI:10.7127/RBAI.V9N600325.

SILVEIRA, JANE MARIA DE CARVALHO et al. Identificação de áreas irrigadas por pivô central na Sub-bacia Tambaú-Verde utilizando imagens CCD/CBERS. **Irriga, Botucatu**, v. 18, n. 4, p. 721-729, 2013.

TALAMINI, Edson; OLIVEIRA, Leticia de. **Sistemas de irrigação: Vantagem competitiva e/ou incerteza**. 2008.

TARJUELO, J. M.; RODRIGUEZ-DIAZ, J. A.; ABADÍA, R.; CAMACHO, E.; ROCAMORA, C.; MORENO, M. A. Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies. *Agricultural Water Management*. vol. 162, p. 67-77, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.08.009>.

ZOCOLER, J. L. Análise econômica de sistemas de irrigação. **MIRANDA, JH; PIRES, RCM Irrigação. Jaboticabal: Funep**, p. 653-703, 2003.

## ANEXOS

Tabela 20 - Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 50 ha em Luís Eduardo Magalhães.

Combina- ções	hf (m)	Demanda (R\$)	127 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )		hf (m)	Demanda (R\$)	143 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	
			Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)			Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)
PC1	6,56	193,15	14327,30	15716,25	8,18	230,69	17112,03	18770,95
PC2	1,68	157,65	11694,24	12827,93	2,10	180,90	13418,59	14719,44
PC3	1,70	157,75	11701,21	12835,57	2,11	181,03	13428,01	14729,78
PC4	3,20	168,66	12510,86	13723,72	3,98	196,34	14564,08	15975,98
PC5	0,89	151,91	11268,11	12360,49	1,11	172,84	12820,71	14063,61
PC6	1,71	157,88	11710,91	12846,22	2,13	181,22	13441,98	14745,10
PC7	3,07	167,75	12442,81	13649,07	3,82	195,06	14468,62	15871,27
PC8	0,90	151,99	11274,04	12367,00	1,13	172,95	12829,21	14072,93
PC9	1,77	158,31	11742,74	12881,13	2,21	181,82	13486,92	14794,40
PC10	2,94	166,83	12374,76	13574,42	3,67	193,77	14373,16	15766,56
PC11	0,93	152,16	11286,45	12380,60	1,15	173,19	12846,82	14092,25
PC12	1,89	159,15	11805,30	12949,76	2,19	181,71	13478,42	14785,07
PC13	2,82	165,91	12306,70	13499,77	3,51	192,48	14277,70	15661,85
PC14	0,96	152,42	11305,86	12401,90	1,20	173,55	12873,55	14121,57
PC15	2,07	160,47	11902,92	13056,85	2,58	184,84	13711,01	15040,22
PC16	2,69	164,99	12238,65	13425,12	3,35	191,20	14182,25	15557,14
PC17	1,01	152,77	11332,29	12430,89	1,26	174,06	12911,20	14162,87
PC18	2,32	162,29	12038,30	13205,35	2,89	187,41	13901,70	15249,40
PC19	2,57	164,08	12170,60	13350,47	3,20	189,91	14086,79	15452,43

\*Custo de energia total ao ano calculado de acordo com a equação 21.

Tabela 21 - Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 80 ha em Luís Eduardo Magalhães.

Combinações	204 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )				229 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )			
	hf (m)	Demanda (R\$)	Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)	hf (m)	Demanda (R\$)	Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)
PC1	15,7	418,00	31006,21	34012,10	19,56	518,65	38471,95	42201,59
PC2	4,05	280,85	20832,53	22852,13	5,01	327,93	24324,97	26683,14
PC3	4,08	281,20	20858,44	22880,55	5,05	328,43	24361,86	26723,61
PC4	7,69	323,39	23987,82	26313,30	9,52	387,08	28712,54	31496,06
PC5	2,15	258,65	19185,50	21045,43	2,66	297,06	22034,60	24170,73
PC6	4,12	281,72	20897,42	22923,31	5,11	329,15	24415,35	26782,28
PC7	7,38	319,84	23724,88	26024,87	9,15	382,15	28346,91	31094,99
PC8	2,17	258,97	19209,76	21072,04	2,69	297,51	22068,64	24208,07
PC9	4,26	283,38	21020,45	23058,26	5,28	331,46	24586,52	26970,04
PC10	7,08	316,30	23461,94	25736,44	8,77	377,22	27981,28	30693,91
PC11	2,23	259,62	19257,41	21124,31	2,76	298,39	22133,80	24279,55
PC12	4,54	286,63	21261,29	23322,46	5,63	335,97	24921,07	27337,03
PC13	6,78	312,75	23199,00	25448,01	8,40	372,30	27615,65	30292,83
PC14	2,31	260,61	19331,05	21205,09	2,87	299,78	22236,88	24392,63
PC15	4,98	291,71	21638,16	23735,86	6,16	343,04	25445,26	27912,04
PC16	6,47	309,21	22936,06	25159,58	8,02	367,37	27250,02	29891,76
PC17	2,43	262,00	19434,14	21318,18	3,01	301,72	22380,82	24550,52
PC18	5,58	298,79	22163,17	24311,77	6,91	352,87	26174,66	28712,14
PC19	6,17	305,66	22673,12	24871,15	7,64	362,44	26884,39	29490,68
PC20	2,59	263,78	19566,70	21463,58	3,20	304,20	22564,63	24752,14
PC21	6,36	307,88	22837,20	25051,14	7,88	365,51	27112,17	29740,55
PC22	5,87	302,12	22410,17	24582,72	7,27	357,51	26518,75	29089,60
PC23	2,77	265,96	19727,84	21640,34	3,43	307,22	22788,31	24997,51
PC24	7,31	318,91	23655,91	25949,22	9,05	380,87	28251,98	30990,85
PC25	5,56	298,57	22147,23	24294,29	6,89	352,58	26153,12	28688,53

\*Custo de energia total ao ano calculado de acordo com a equação 21.

Tabela 22 - Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 100 ha em Luís Eduardo Magalhães.

Combinações	hf (m)	Demanda (R\$)	254 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )		286 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )		Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)
			Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)	hf (m)	Demanda (R\$)		
PC1	23,7	635,44	47134,94	51704,41	29,5	810,86	60146,75	65977,65
PC2	6,07	379,15	28124,21	30850,70	7,56	451,36	33480,08	36725,79
PC3	6,12	379,82	28173,51	30904,77	7,62	452,28	33548,47	36800,81
PC4	11,5	458,64	34020,24	37318,31	14,3	562,85	41750,53	45798,02
PC5	3,22	337,66	25046,35	27474,46	4,01	393,15	29162,55	31989,69
PC6	6,19	380,79	28245,78	30984,05	7,71	453,65	33650,49	36912,72
PC7	11,0	452,01	33528,90	36779,34	13,8	553,56	41061,33	45042,00
PC8	3,26	338,27	25091,66	27524,16	4,06	394,02	29226,92	32060,31
PC9	6,40	383,89	28475,54	31236,09	7,97	458,01	33973,58	37267,13
PC10	10,6	445,39	33037,57	36240,38	13,2	544,27	40372,12	44285,98
PC11	3,34	339,46	25180,11	27621,18	4,17	395,69	29350,81	32196,21
PC12	6,82	389,95	28925,36	31729,51	8,49	466,51	34603,95	37958,62
PC13	10,1	438,77	32546,23	35701,41	12,6	534,98	39682,92	43529,96
PC14	3,47	341,32	25318,18	27772,64	4,33	398,31	29545,15	32409,38
PC15	7,47	399,45	29629,75	32502,19	9,30	479,84	35592,64	39043,15
PC16	9,72	432,14	32054,90	35162,44	12,1	525,69	38993,71	42773,94
PC17	3,65	343,93	25511,27	27984,45	4,55	401,94	29814,79	32705,17
PC18	8,38	412,67	30610,29	33577,79	10,4	498,37	36967,57	40551,37
PC19	9,26	425,52	31563,56	34623,47	11,5	516,40	38304,51	42017,92
PC20	3,88	347,26	25758,29	28255,42	4,83	406,63	30162,16	33086,22
PC21	9,55	429,65	31870,21	34959,85	11,8	522,20	38734,81	42489,94
PC22	8,81	418,89	31072,22	34084,51	10,9	507,10	37615,30	41261,90
PC23	4,16	351,31	26059,25	28585,55	5,18	412,31	30583,63	33548,54
PC24	10,9	450,03	33381,47	36617,62	13,6	551,13	40881,01	44844,20
PC25	8,35	412,27	30580,89	33545,54	10,4	497,81	36926,10	40505,88
PC26	4,48	356,04	26409,83	28970,12	5,58	418,92	31074,33	34086,81
PC27	12,6	474,31	35182,90	38593,69	15,7	584,84	43381,87	47587,50
PC28	7,89	405,65	30089,55	33006,57	9,83	488,52	36236,90	39749,86

\*Custo de energia total ao ano calculado de acordo com a equação 21.

Tabela 23 - Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 125 ha em Luís Eduardo Magalhães.

Combinações	318 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )				357 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )			
	hf (m)	Demanda (R\$)	Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)	hf (m)	Demanda (R\$)	Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)
PC1	35,9	1018,23	75529,11	82851,24	44,5	1318,56	97806,49	107288,29
PC2	9,21	531,75	39443,41	43267,23	11,4	641,92	47615,85	52231,95
PC3	9,28	533,01	39537,22	43370,13	11,4	643,68	47745,86	52374,56
PC4	17,4	682,63	50635,10	55543,90	21,6	851,78	63182,08	69307,23
PC5	4,88	453,00	33601,77	36859,28	6,05	532,38	39490,55	43318,94
PC6	9,38	534,85	39673,62	43519,76	11,6	646,23	47935,38	52582,45
PC7	16,8	670,05	49702,46	54520,84	20,8	834,29	61884,89	67884,29
PC8	4,94	454,14	33686,86	36952,61	6,13	534,00	39610,32	43450,33
PC9	9,70	540,75	40111,18	43999,74	12,0	654,45	48544,86	53251,01
PC10	16,1	657,48	48769,82	53497,79	19,9	816,80	60587,71	66461,35
PC11	5,07	456,40	33854,32	37136,31	6,28	537,13	39842,29	43704,78
PC12	10,3	552,24	40963,35	44934,52	12,8	670,43	49730,47	54551,56
PC13	15,4	644,91	47837,18	52474,73	19,1	799,31	59290,52	65038,41
PC14	5,26	459,95	34117,66	37425,18	6,52	542,07	40209,19	44107,25
PC15	11,3	570,28	42301,69	46402,61	14,0	695,53	51592,27	56593,86
PC16	14,7	632,34	46904,54	51451,68	18,2	781,83	57993,34	63615,47
PC17	5,53	464,89	34483,65	37826,65	6,86	548,92	40717,10	44664,39
PC18	12,7	595,37	44162,68	48444,01	15,7	730,40	54178,78	59431,12
PC19	14,0	619,76	45971,90	50428,62	17,4	764,34	56696,15	62192,53
PC20	5,88	471,20	34952,27	38340,70	7,29	557,73	41370,55	45381,19
PC21	14,4	627,60	46553,06	51066,13	17,9	775,25	57505,17	63079,98
PC22	13,3	607,19	45039,26	49405,57	16,5	746,85	55398,97	60769,59
PC23	6,30	478,90	35523,53	38967,35	7,81	568,42	42163,48	46251,00
PC24	16,6	666,78	49459,34	54254,15	20,6	829,74	61547,16	67513,82
PC25	12,6	594,62	44106,62	48382,51	15,6	729,36	54101,78	59346,65
PC26	6,80	487,86	36187,98	39696,21	8,42	580,89	43088,32	47265,49
PC27	19,1	712,38	52842,34	57965,11	23,7	893,18	66253,22	72676,10
PC28	11,9	582,04	43173,98	47359,45	14,8	711,88	52804,59	57923,71
PC29	7,35	497,95	36936,16	40516,91	9,11	594,91	44128,38	48406,38
PC30	21,9	763,73	56650,75	62142,72	27,1	964,58	71549,05	78485,33
PC31	11,2	569,47	42241,34	46336,40	13,9	694,39	51507,41	56500,77

\*Custo de energia total ao ano calculado de acordo com a equação 21.

Tabela 24 - Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 50 ha em Cristalina.

Combina- ções	hf (m)	123 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )			138 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )			
		Demanda (R\$)	Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)	hf (m)	Demanda (R\$)	Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)
PC1	6,19	184,41	13469,55	14778,41	7,66	218,51	15960,15	17511,02
PC2	1,59	152,01	11102,93	12181,81	1,96	173,52	12674,24	13905,81
PC3	1,60	152,09	11108,96	12188,43	2,00	173,80	12694,55	13928,09
PC4	3,01	162,06	11836,92	12987,12	3,73	187,47	13693,34	15023,94
PC5	0,84	146,76	10719,57	11761,21	1,04	166,24	12142,26	13322,14
PC6	1,62	152,22	11118,21	12198,58	2,00	173,80	12695,13	13928,72
PC7	2,89	161,22	11775,75	12920,01	3,58	186,31	13608,41	14930,76
PC8	0,85	146,84	10725,23	11767,41	1,05	166,35	12150,34	13331,00
PC9	1,67	152,60	11146,51	12229,62	2,07	174,35	12734,95	13972,41
PC10	2,77	160,38	11714,59	12852,90	3,43	185,15	13523,49	14837,58
PC11	0,87	146,99	10736,55	11779,83	1,08	166,55	12165,34	13347,46
PC12	1,78	153,37	11202,57	12291,14	2,20	175,42	12812,85	14057,89
PC13	2,66	159,54	11653,42	12785,80	3,29	183,98	13438,57	14744,41
PC14	0,91	147,22	10753,52	11798,45	1,12	166,88	12189,58	13374,06
PC15	1,95	154,58	11290,53	12387,64	2,41	177,08	12934,62	14191,49
PC16	2,54	158,71	11592,25	12718,69	3,14	182,82	13353,64	14651,23
PC17	0,95	147,55	10777,70	11824,98	1,18	167,33	12222,48	13410,15
PC18	0,00	140,84	10287,50	11287,15	2,71	179,40	13103,71	14377,02
PC19	2,42	157,87	11531,09	12651,58	2,99	181,66	13268,72	14558,05

\*Custo de energia total ao ano calculado de acordo com a equação 21.

Tabela 25 - Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 80 ha em Cristalina.

Combinações	197 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )				221 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )			
	hf (m)	Demanda (R\$)	Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)	hf (m)	Demanda (R\$)	Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)
PC1	14,80	392,51	28669,88	31455,76	18,31	484,76	35408,12	38848,77
PC2	3,79	268,36	19601,32	21506,00	4,69	312,43	22820,98	25038,52
PC3	3,82	268,67	19624,61	21531,55	4,73	312,88	22853,67	25074,39
PC4	7,21	306,86	22413,86	24591,84	8,92	365,88	26724,78	29321,66
PC5	2,01	248,26	18133,46	19895,51	2,49	284,54	20783,46	22803,01
PC6	3,86	269,15	19659,21	21569,51	4,78	313,53	22900,81	25126,10
PC7	6,92	303,65	22179,48	24334,69	8,56	361,43	26399,46	28964,73
PC8	2,04	248,55	18154,88	19919,01	2,52	284,94	20813,03	22835,46
PC9	4,00	270,65	19768,78	21689,73	4,95	315,63	23054,22	25294,43
PC10	6,64	300,44	21945,10	24077,53	8,21	356,97	26074,15	28607,80
PC11	2,09	249,13	18196,90	19965,11	2,58	285,74	20871,26	22899,34
PC12	4,26	273,59	19983,80	21925,65	5,27	319,69	23350,89	25619,92
PC13	6,35	297,23	21710,73	23820,38	7,86	352,52	25748,83	28250,87
PC14	2,17	250,03	18262,80	20037,42	2,68	287,01	20963,68	23000,74
PC15	4,67	278,19	20319,92	22294,43	5,77	326,08	23817,61	26132,00
PC16	6,07	294,03	21476,35	23563,23	7,51	348,07	25423,51	27893,94
PC17	2,28	251,29	18355,07	20138,66	2,82	288,75	21091,22	23140,67
PC18	5,23	284,59	20787,04	22806,94	6,47	334,97	24467,33	26844,85
PC19	5,78	290,82	21241,97	23306,08	7,16	343,61	25098,20	27537,01
PC20	2,42	252,91	18472,88	20267,91	3,00	290,99	21254,80	23320,15
PC21	5,96	292,82	21388,44	23466,78	7,38	346,39	25300,96	27759,48
PC22	5,50	287,61	21007,59	23048,92	6,80	339,16	24772,88	27180,09
PC23	2,60	254,87	18616,23	20425,19	3,21	293,71	21453,51	23538,17
PC24	6,85	302,82	22118,36	24267,62	8,47	360,27	26314,81	28871,85
PC25	5,22	284,40	20773,21	22791,77	6,45	334,70	24447,56	26823,16

\*Custo de energia total ao ano calculado de acordo com a equação 21.

Tabela 26- Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 100 ha em Cristalina.

Combinações	hf (m)	Demanda (R\$)	246 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )		276 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )		Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)
			Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)	hf (m)	Demanda (R\$)		
PC1	22,3	596,22	43549,45	47781,20	27,6	752,75	54982,70	60325,42
PC2	5,72	362,29	26462,39	29033,77	7,08	427,95	31258,41	34295,83
PC3	5,77	362,90	26506,77	29082,46	7,14	428,78	31319,41	34362,75
PC4	10,8	434,84	31761,81	34848,14	13,4	528,68	38616,31	42368,70
PC5	3,03	324,42	23696,23	25998,81	3,76	375,37	27418,19	30082,45
PC6	5,83	363,78	26571,58	29153,57	7,21	430,02	31409,44	34461,53
PC7	10,4	428,79	31320,19	34363,61	12,9	520,29	38003,15	41695,96
PC8	3,07	324,98	23737,38	26043,96	3,80	376,15	27474,75	30144,50
PC9	6,03	366,61	26778,36	29380,44	7,46	433,97	31697,99	34778,12
PC10	10,0	422,75	30878,57	33879,07	12,3	511,89	37389,99	41023,22
PC11	3,15	326,07	23816,59	26130,87	3,90	377,65	27584,40	30264,80
PC12	7,90	392,88	28696,98	31485,50	7,95	441,63	32257,78	35392,31
PC13	9,59	416,70	30436,95	33394,54	11,8	503,50	36776,83	40350,48
PC14	3,27	327,77	23941,07	26267,45	4,05	380,02	27757,53	30454,76
PC15	7,04	380,83	27816,37	30519,32	8,71	453,67	33137,29	36357,28
PC16	9,16	410,66	29995,33	32910,01	11,3	495,11	36163,68	39677,74
PC17	3,44	330,14	24113,90	26457,07	4,26	383,31	27997,60	30718,16
PC18	7,90	392,88	28696,98	31485,50	9,77	470,42	34360,75	37699,62
PC19	8,73	404,61	29553,72	32425,48	10,8	486,71	35550,52	39005,00
PC20	3,66	333,18	24336,11	26700,87	4,52	387,53	28305,78	31056,28
PC21	9,00	408,39	29829,63	32728,21	11,1	491,94	35932,78	39424,41
PC22	8,30	398,56	29112,10	31940,95	10,2	478,32	34937,36	38332,26
PC23	3,92	336,88	24606,67	26997,73	4,85	392,66	28680,90	31467,85
PC24	10,3	427,22	31205,07	34237,30	12,7	518,10	37842,99	41520,24
PC25	7,87	392,52	28670,48	31456,42	9,74	469,92	34324,20	37659,52
PC26	4,23	341,19	24921,47	27343,11	5,23	398,65	29118,34	31947,80
PC27	11,8	449,15	32806,84	35994,71	14,7	548,56	40068,30	43961,79
PC28	7,44	386,47	28228,86	30971,89	9,21	461,53	33711,04	36986,78

\*Custo de energia total ao ano calculado de acordo com a equação 21.

Tabela 27- Vazão, perda de carga, demanda, consumo de energia e custo total de energia para 125 ha em Cristalina.

Combinações	308 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )				345 (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )			
	hf (m)	Demanda (R\$)	Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)	hf (m)	Demanda (R\$)	Consumo de Energia (R\$)	Custo total de Energia (R\$)
PC1	33,8	949,81	69376,47	76117,86	41,7	1220,29	89133,10	97794,27
PC2	8,67	505,69	36937,50	40526,76	10,7	606,52	44301,89	48606,76
PC3	8,74	506,85	37021,79	40619,24	10,7	608,11	44418,22	48734,38
PC4	16,4	643,43	46998,18	51565,05	20,3	796,87	58205,93	63861,87
PC5	4,6	433,79	31685,49	34764,41	5,67	507,16	37044,28	40643,91
PC6	8,83	508,52	37144,16	40753,50	10,9	610,42	44587,02	48919,59
PC7	15,8	631,95	46159,79	50645,19	19,5	781,01	57047,26	62590,61
PC8	4,66	434,85	31762,77	34849,20	5,75	508,62	37151,04	40761,05
PC9	9,14	513,92	37538,29	41185,93	11,2	617,87	45130,94	49516,36
PC10	15,1	620,48	45321,40	49725,33	18,7	765,15	55888,59	61319,35
PC11	4,77	436,91	31913,47	35014,54	5,89	511,46	37358,80	40988,99
PC12	9,73	524,41	38304,67	42026,78	12,0	632,39	46191,37	50679,83
PC13	14,5	609,00	44483,01	48805,48	17,9	749,28	54729,92	60048,09
PC14	4,96	440,16	32150,47	35274,57	6,12	515,95	37686,30909	41348,32
PC15	10,6	540,88	39507,69	43346,69	13,1	655,14	47853,4321	52503,40
PC16	13,8	597,52	43644,62	47885,62	17,1	733,42	53571,25751	58776,83
PC17	5,21	444,65	32478,92	35634,93	6,43	522,15	38139,33543	41845,37
PC18	11,9	563,77	41179,55	45181,01	14,7	686,78	50164,73209	55039,29
PC19	13,2	586,04	42806,23	46965,76	16,3	717,56	52412,58759	57505,57
PC20	5,54	450,44	32901,39	36098,46	6,84	530,15	38723,65284	42486,47
PC21	13,6	593,20	43329,27	47539,62	16,8	727,45	53135,37297	58298,59
PC22	12,5	574,56	41967,84	46045,90	15,5	701,70	51253,91766	56234,31
PC23	5,94	457,46	33414,03	36660,90	7,33	539,85	39432,04753	43263,70
PC24	15,6	628,96	45941,39	50405,57	19,3	776,87	56745,15611	62259,14
PC25	11,9	563,09	41129,45	45126,05	14,7	685,83	50095,24774	54963,05
PC26	6,41	465,64	34011,67	37316,62	7,90	551,14	40257,30571	44169,15
PC27	18,0	670,60	48982,43	53742,10	22,2	834,43	60949,35597	66871,87
PC28	11,2	551,61	40291,06	44206,19	13,9	669,97	48936,57782	53691,79
PC29	6,93	474,85	34684,02	38054,31	8,54	563,87	41186,442	45188,57
PC30	20,6	717,47	52406,01	57498,35	25,5	899,18	65678,72	72060,79
PC31	10,6	540,13	39452,67	43286,33	13,1	654,11	47777,90	52420,53

\*Custo de energia total ao ano calculado de acordo com a equação 21.