



**RODRIGO RAFAEL SALVADOR**

**ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DA VELOCIDADE DE  
ROTAÇÃO DE UNIDADES DE BOMBEAMENTO DE PIVÔ  
CENTRAL**

**LAVRAS-MG  
2023**

**RODRIGO RAFAEL SALVADOR**

**ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DE UNIDADES  
DE BOMBEAMENTO DE PIVÔ CENTRAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Alberto Colombo  
Orientador

Prof. Dr. Victor Buono da Silva Baptista  
Coorientador

**LAVRAS – MG  
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Salvador, Rodrigo Rafael.

Estratégias de controle da velocidade de rotação de unidades de  
bombeamento de pivô central / Rodrigo Rafael Salvador. - 2023.  
97 p. : il.

Orientador(a): Alberto Colombo.

Coorientador(a): Victor Buono da Silva Baptista.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Irrigação. 2. Bomba centrífuga. 3. Inversor de frequência. I.  
Colombo, Alberto. II. Baptista, Victor Buono da Silva. III. Título.

**RODRIGO RAFAEL SALVADOR**

**ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DE UNIDADES  
DE BOMBEAMENTO DE PIVÔ CENTRAL**

**ROTATION SPEED CONTROL STRATEGIES FOR CENTER PIVOT  
PUMPING UNITS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 13 de abril de 2023.

Prof. Dr. Lessandro Coll Faria                      UFPel

Prof. Dr. Adriano Valentim Diotto                UFLA

Prof. Dr. Alberto Colombo  
Orientador



Prof. Dr. Victor Buono da Silva Baptista  
Coorientador

**LAVRAS – MG  
2023**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde, sabedoria, e me manter firme e perseverante em todos os momentos.

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos.

À coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao meu orientador, Professor Dr. Alberto Colombo, pelo apoio indispensável na condução deste trabalho, pela oportunidade de aprendizagem através do conhecimento compartilhado e pelo exemplo profissional.

Ao meu coorientador, Professor Dr. Victor Buono da Silva Baptista, agradeço pelas contribuições e aprendizado pelos conhecimentos compartilhados.

Agradeço aos meus pais, Rafael Salvador e Claudia Salvador, à minha tia Cristiane Maria dos Santos e ao meu irmão Tiago Salvador, que nunca mediram esforços para que eu pudesse me dedicar aos estudos, por todo o amor, dedicação, confiança e apoio.

Ao amigo Samuel Cunha, que se fez presente com conselhos e orientações durante essa etapa.

Aos demais amigos, Filipe Borges, Athos Marques, Hermes Marçal, Cássio Rodrigues e Rodrigo Martins, que mesmo distantes fisicamente se fizeram presentes durante essa etapa.

Por fim, agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram com minha evolução pessoal e profissional.

Muito obrigado!

## RESUMO

Unidades de bombeamento de pivô central que operam com velocidade de rotação fixa são projetadas para atender o desnível topográfico da posição angular que requer a maior altura manométrica total. Em áreas onde os desníveis topográficos nas diferentes posições angulares da linha lateral apresentam grande variação, é possível reduzir o consumo de energia do bombeamento com a utilização de um inversor de frequência. No entanto, o uso de inversores requer o desenvolvimento de estratégias para a variação da velocidade de rotação da bomba que não induzam deficiências de pressão ao longo da linha lateral móvel que afetam a qualidade da irrigação. Dois pivôs centrais com válvulas reguladoras de pressão de 69kPa (10psi), que operam em terrenos de topografia acidentada foram considerados neste estudo: um de 15 torres, em Vila Propício-Goiás; e outro, de 7 torres, em Formiga-Minas Gerais. Estes pivôs foram submetidos a cinco estratégias de controle da velocidade de rotação da unidade de bombeamento, que envolvem diferentes combinações entre (i) a localização do ponto, ou pontos, de controle da pressão e (ii) o valor de referência da pressão na posição de controle. Cada estratégia foi avaliada pela adequação da distribuição espacial da pressão na linha lateral, conforme simulação do EPANET2.2, e o correspondente valor do consumo específico de energia (kWh/m<sup>3</sup>). Nos dois pivôs, a qualidade da irrigação foi prejudicada pela estratégia que associou o controle nas extremidades da linha lateral com um valor de referência de pressão igual ao comumente recomendado (130kPa) para as válvulas reguladoras utilizadas. No entanto, quando o controle da pressão nas extremidades foi associado a valores de referência maiores que o recomendado (250 kPa em V. Propício e 200 kPa em Formiga), a qualidade da irrigação não foi afetada. O processo de otimização da posição ao longo da linha lateral na qual o controle da pressão deve ser feito indicou posições diferentes para os dois pivôs: 7<sup>o</sup> emissor do 13<sup>o</sup> vão em V. Propício e 7<sup>o</sup> emissor do 6<sup>o</sup> vão em Formiga. No entanto, o valor de referência recomendado para os dois pivôs foi semelhante: 192kPa em V. Propício e 198 kPa em Formiga. No pivô de V. Propício, a redução do consumo de energia obtida com a estratégia baseada em valores otimizados da posição de controle e do valor de referência da pressão foi maior (21%) que a obtida (17%) com o controle nas extremidades com um valor de referência de 192kPa. Em Formiga, as reduções no consumo de energia obtidas com estas mesmas estratégias foram praticamente iguais (34,3 e 33,9%). Conclui-se que a variação da velocidade de rotação da bomba reduz o consumo de energia, mas deve ser feita com base em critérios adequados, que são característicos de cada situação considerada.

**Palavras-chave:** Pivô central, consumo de energia elétrica, velocidade variável.

## ABSTRACT

Center pivot systems pumping units that operate with a fixed rotational speed are designed according to the topographic differences of the angular position that requires the highest total dynamic head. In areas where the topographic differences in the different angular positions of the lateral line vary greatly, it is possible to reduce pumping energy consumption with the use of a frequency inverter. However, the use of inverters requires the development of strategies for varying the pump rotation speed that do not induce pressure deficiencies along the moving lateral line that affect irrigation quality. Two central pivots with 69kPa (10psi) pressure regulating valves, which operate in terrain with uneven topography, were considered in this study: one of 15 towers, in Vila Propício-Goiás; and another, with 7 towers, in Formiga-Minas Gerais. These pivots were submitted to five strategies to control the rotation speed of the pumping unit, which involve different combinations between (i) the location of the pressure control point, or points, and (ii) the reference pressure value at the control point. Each strategy was evaluated by the adequacy of the spatial distribution of pressure in the lateral line, according to the EPANET2.2 simulation, and the corresponding specific energy consumption value (kWh/m<sup>3</sup>). For the two pivots, the irrigation quality was impaired by the strategy that associated the control at the ends of the lateral line with a pressure reference value equal to the commonly recommended one (130kPa) for the regulating valves used. However, when pressure control at the extremities was associated with higher than recommended reference values (250 kPa in V. Propício and 200 kPa in Formiga), irrigation quality was not affected. The process of optimizing the position along the lateral line in which pressure control should be carried out indicated different positions for the two pivots: 7<sup>o</sup> emitter of 13<sup>o</sup> span in V. Propício and 7<sup>o</sup> emitter of 6<sup>o</sup> span in Formiga. However, the recommended reference value for the two center pivots was similar: 192kPa in V. Propício and 198 kPa in Formiga. At V. Propício, the reduction in energy consumption obtained with the strategy based on optimized values of the control position and pressure reference value was greater (21%) than that obtained (17%) with the control at the extremities with a reference value of 192kPa. In Formiga, the reductions in energy consumption obtained with these same strategies were practically the same (34.3 and 33.9%). It is concluded that varying the pump rotation speed reduces energy consumption, but it must be done based on appropriate criteria, which are characteristic of each situation considered.

**Keywords:** Center pivot, electric power consumption, variable speed.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Curva da bomba e curva do sistema com pivô central operando com vazão constante.....	21
Figura 2 -	Curva da bomba e melhor ponto de eficiência da bomba operando com variação da velocidade de rotação. ....	22
Figura 3 -	Curvas de desempenho do motor elétrico. ....	25
Figura 4 -	Interface de um inversor de frequência CFW500. ....	27
Figura 5 -	Referências e saídas no multispeed. ....	28
Figura 6 -	Unidade de bombeamento com uso de inversor de frequência em um esquema de operação de um pivô central.....	29
Figura 7 -	Esquema da válvula reguladora de pressão.....	30
Figura 8 -	A curva de desempenho do regulador PSR-2 ilustra o funcionamento do regulador de pressão dentro da faixa de pressão e vazão de entrada do modelo.....	31
Figura 9 -	Transdutor de pressão.....	32
Figura 10 -	Simulação hidráulica do pivô central 1 sem uso do inversor de frequência no EPANET 2.2.....	34
Figura 11 -	Inserção dos dados da válvula VRP na aba Valve do EPANET 2.2.....	39
Figura 12 -	Inserção dos dados do canhão final na aba Canhão no EPANET 2.2. ....	39
Figura 13 -	Inserção do novo valor de velocidade de rotação (Speed) no EPANET 2.2.....	42
Figura 14 -	Conferindo se o valor de setting da VRP está correto quando modificada a velocidade de rotação. ....	50
Figura 15 -	Distribuição espacial de carga de pressão ao longo da linha lateral, com a marcação do ponto de mínima carga de pressão para cada angulação ( $\theta$ ) com o pivô central 1 operando sem o uso do inversor de frequência (S). ....	55
Figura 16 -	Distribuição espacial de carga de pressão ao longo da linha lateral, com a marcação do ponto de mínima carga de pressão para cada angulação ( $\theta$ ) com o pivô central 2 operando sem o uso do inversor de frequência (S). ....	56
Figura 17 -	Distribuição espacial de carga de pressão ao longo da linha lateral, com a marcação do ponto de mínima carga de pressão para cada angulação ( $\theta$ ) com o pivô central 1 operando no Monitoramento Total (T).....	57
Figura 18 -	Distribuição espacial de carga de pressão ao longo da linha lateral, com a marcação do ponto de mínima carga de pressão para cada angulação ( $\theta$ ) com o pivô central 2 operando no Monitoramento Total (T).....	58

Figura 19 - Distribuição espacial de carga de pressão ao longo da linha lateral, com a marcação do ponto de mínima carga de pressão para cada angulação ( $\theta$ ) com o pivô central 1 operando na Estratégia de Monitoramento com Posicionamento Otimizado (P). .....	59
Figura 20 - Distribuição espacial de carga de pressão ao longo da linha lateral, com a marcação do ponto de mínima carga de pressão para cada angulação ( $\theta$ ) com o pivô central 2 operando na Estratégia de Monitoramento com Posicionamento Otimizado (P). .....	60
Figura 21 - Localização do ponto V13JP7 do pivô central 1. ....	61
Figura 22 - Localização do ponto V6JP7 do pivô central 2. ....	62
Figura 23 - Distribuição espacial de carga de pressão ao longo da linha lateral, com a marcação do ponto de mínima carga de pressão para cada angulação ( $\theta$ ) com o pivô central 1 operando com a estratégia de Monitoramento Otimizado das Extremidades (EO). ....	63
Figura 24 - Distribuição espacial de carga de pressão ao longo da linha lateral, com a marcação do ponto de mínima carga de pressão para cada angulação ( $\theta$ ) com o pivô central 2 operando com a estratégia de Monitoramento Otimizado das Extremidades (EO). ....	64
Figura 25 - Distribuição espacial de carga de pressão ao longo da linha lateral, com a marcação do ponto de mínima carga de pressão para cada angulação ( $\theta$ ) com o pivô central 1 operando Monitoramento das Extremidades(E). ....	65
Figura 26 - Distribuição espacial de carga de pressão ao longo da linha lateral, com a marcação do ponto de mínima carga de pressão para cada angulação ( $\theta$ ) com o pivô central 2 operando Monitoramento das Extremidades(E). ....	66
Figura 27 - Valores referentes da sucção até o ponto do pivô central inseridos no VSPM para gerar o arquivo para leitura em EPANET 2.2 do pivô central . ....	90
Figura 28 - Valores referentes dos vãos do pivô central e inserção dos valores das cotas no VSPM para gerar o arquivo para leitura em EPANET 2.2 do pivô central 1. ....	91
Figura 29 - Valores referentes da sucção até o ponto do pivô central inseridos no VSPM para gerar o arquivo para leitura em EPANET 2.2 do pivô central 2. ....	95
Figura 30 - Valores referentes dos vãos do pivô central e inserção dos valores das cotas no VSPM para gerar o arquivo para leitura em EPANET 2.2 do pivô central 2. ....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Dados para os equipamentos pivô 1 e pivô 2. ....	36
Tabela 2 -	Dados do canhão final TWIN MAX 18. ....	40
Tabela 3 -	Valores dos parâmetros da curva da bomba gerados pelo EPANET 2.2 para o pivô central 1 e 2. ....	41
Tabela 4 -	Valores dos parâmetros do rendimento da bomba determinados para o pivô central 1 e 2. ....	51
Tabela 5 -	Valores dos parâmetros do rendimento do motor determinados para o pivô central 1 e 2. ....	53
Tabela 6 -	Dados do pivô central Formiga operando sem variação da rotação. ....	67
Tabela 7 -	$(\alpha_{T(J)})$ , alturas manométricas totais ( $HMT_{T(J)} (m)$ ), rendimentos da bomba( $\eta_{b,T(J)}$ ), rendimentos do motor( $\eta_{m,T(J)}$ ), as vazões bombeadas ( $Q_{T,(J)} (m^3/h)$ ), potências mecânicas( $Pot_{MecT,(J)}(kW)$ ), carregamentos (K), rendimentos do inversor ( $\eta_i$ ) e os consumos específicos de energia elétrica ( $CE_{T,(J)} (kWh/m^3)$ ) para o Monitoramento Total (T) do pivô central 1. ....	75
Tabela 8 -	$(\alpha_{P(J)})$ , alturas manométricas totais ( $HMT_{P(J)} (m)$ ), rendimentos da bomba( $\eta_{b,P(J)}$ ), rendimentos do motor( $\eta_{m,P(J)}$ ), as vazões bombeadas ( $Q_{P,(J)} (m^3/h)$ ), potências mecânicas( $Pot_{Mec P,(J)}(kW)$ ), carregamentos (K), rendimentos do inversor ( $\eta_i$ ) e os consumos específicos de energia elétrica ( $CE_{P,(J)} (kWh/m^3)$ ) para a estratégia de Monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) do pivô central 1. ....	77
Tabela 9 -	$(\alpha_{EO(J)})$ , alturas manométricas totais ( $HMT_{EO(J)} (m)$ ), rendimentos da bomba( $\eta_{b,EO(J)}$ ), rendimentos do motor( $\eta_{m,EO(J)}$ ), as vazões bombeadas ( $Q_{,(J)} (m^3/h)$ ), potências mecânicas( $Pot_{Mec EO,(J)}(kW)$ ), carregamentos (K), rendimentos do inversor ( $\eta_i$ ) e os consumos específicos de energia elétrica ( $CE_{EO,(J)} (kWh/m^3)$ ) para a estratégia de Monitoramento Otimizado das Extremidades (EO) pivô central 1. (continua) ....	79
Tabela 10 -	$(\alpha_{T(J)})$ , alturas manométricas totais ( $HMT_{T(J)} (m)$ ), rendimentos da bomba( $\eta_{b,T(J)}$ ), rendimentos do motor( $\eta_{m,T(J)}$ ), as vazões bombeadas ( $Q_{T,(J)} (m^3/h)$ ), potências mecânicas( $Pot_{MecT,(J)}(kW)$ ), carregamentos (K), rendimentos do inversor ( $\eta_i$ ) e os consumos específicos de energia elétrica ( $CE_{T,(J)} (kWh/m^3)$ ) para o Monitoramento Total (T) do pivô central 2. ....	81

Tabela 11 - ( $\alpha_{P(J)}$ ), alturas manométricas totais ( $HMT_{P(J)}$ (m)), rendimentos da bomba( $\eta_{b,P(J)}$ ), rendimentos do motor( $\eta_{m,P(J)}$ ), as vazões bombeadas ( $Q_{P,(J)}$ (m <sup>3</sup> /h)), potências mecânicas( $Pot_{Mec P,(J)}$ (kW)), carregamentos (K), rendimentos do inversor ( $\eta_i$ ) e os consumos específicos de energia elétrica ( $CE_{P,(J)}$ (kWh/m <sup>3</sup> )) para a estratégia de Monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) do pivô central 2.....	83
Tabela 12 - ( $\alpha_{EO(J)}$ ), alturas manométricas totais ( $HMT_{EO(J)}$ (m)), rendimentos da bomba( $\eta_{b,EO(J)}$ ), rendimentos do motor( $\eta_{m,EO(J)}$ ), as vazões bombeadas ( $Q_{,(J)}$ (m <sup>3</sup> /h)), potências mecânicas( $Pot_{Mec EO,(J)}$ (kW)), carregamentos (K), rendimentos do inversor ( $\eta_i$ ) e os consumos específicos de energia elétrica ( $CE_{EO,(J)}$ (kWh/m <sup>3</sup> )) para a estratégia de Monitoramento Otimizado das Extremidades (EO) do pivô central 2.....	85
Tabela 13 - Valores de cotas das torres para cada angulação ( $\theta$ ) da posição 10° a 120° e os $\alpha$ para Monitoramento Total (T), Estratégia de monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) e Monitoramento Otimizado das Extremidades(EO) para o pivô central 1.....	87
Tabela 14 - Valores de cotas das torres para cada angulação ( $\theta$ ) da posição 130° a 250 ° e os $\alpha$ para as estratégias de Monitoramento Total (T), Estratégia de monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) e Monitoramento Otimizado das Extremidades(EO) para o pivô central 1.....	88
Tabela 15 - Valores de cotas das torres para cada angulação ( $\theta$ ) da posição 250 ° a 360° e os $\alpha$ para as estratégias de Monitoramento Total (T), Estratégia de monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) e Monitoramento Otimizado das Extremidades(EO) para o pivô central 1.....	89
Tabela 16 - Valores de cotas das torres para cada angulação ( $\theta$ ) da posição 10° a 120° e os $\alpha$ das estratégias de Monitoramento Total (T), Estratégia de monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) e M Monitoramento Otimizado das Extremidades(EO) para o pivô central 2.....	92
Tabela 17 - Valores de cotas das torres para cada angulação ( $\theta$ ) da posição 130° a 250° e os $\alpha$ das estratégias de Monitoramento Total (T), Estratégia de monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) e Monitoramento Otimizado das Extremidades(EO) para o pivô central 2.....	93

Tabela 18 - Valores de cotas das torres para cada angulação ( $\theta$ ) da posição 260° a 360° e os  $\alpha$  das Monitoramento Total (T), Estratégia de monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) e Monitoramento Otimizado das Extremidades(EO) para o pivô central 2. ....94

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>A<sub>b</sub></b>	coeficiente da equação da curva da bomba
<b>B<sub>b</sub>,</b>	coeficiente da equação da curva da bomba
<b>b<sub>e</sub></b>	coeficiente de ajuste da equação de rendimento da bomba
<b>C<sub>b</sub></b>	coeficiente da equação da curva da bomba
<b>a<sub>e</sub></b>	coeficiente de ajuste da equação de rendimento da bomba
<b>c<sub>e</sub></b>	coeficiente de ajuste da equação de rendimento da bomba
<b>CE<sub>w(J)</sub></b>	consumo específico de energia elétrica de acordo com a estratégia e posição angular
<b>d<sub>e</sub></b>	coeficiente de ajuste da equação de rendimento da bomba
<b>DP</b>	Desvio padrão
<b>E</b>	Monitoramento das extremidades.
<b>EO</b>	Estratégia do monitoramento otimizado das extremidades
<b>EHMT<sub>P(J)</sub></b>	Excesso de altura manométrica total da de cada posição angular (J), que será dissipado pela válvula reguladora de pressão na posição que tem a menor carga de pressão $h_{S(i_p, J)}$ disponível em sua entrada sem a variação de rotação para a estratégia de monitoramento com posicionamento otimizado
<b>EHMT<sub>T(J)</sub></b>	Excesso de altura manométrica total da de cada posição angular (J), que será dissipado pela válvula reguladora de pressão na posição que tem a menor carga de pressão ( $h_{minT(J)}$ ) disponível em sua entrada para pivô central no monitoramento total
<b>EHMT<sub>E(J)</sub></b>	Excesso de altura manométrica total da de cada posição angular (J), que será dissipado pela válvula reguladora de pressão na posição que tem a menor carga de pressão ( $h_{minE(J)}$ ) disponível em sua entrada para o monitoramento das extremidades.
<b>EHMT<sub>EO(J)</sub></b>	Excesso de altura manométrica total da posição angular (J), que será dissipado pela válvula reguladora da posição que tem a menor carga de pressão ( $h_{minEO(J)}$ ) disponível em sua entrada para a estratégia sem variação de rotação.
<b>F<sub>m</sub> e G<sub>m</sub></b>	coeficientes de ajuste da equação de rendimento do motor
<b>g</b>	Aceleração da gravidade.
<b>h<sub>VRP</sub></b>	carga de pressão regulada pela válvula VRP
<b>h<sub>L</sub></b>	perda de carga da peça especial

$h_{\min Eo(J)}$	É o menor valor de carga de pressão disponível na entrada de uma VRP na posição angular (J) comparando a primeira saída com a última somente
$h_{\min T(J)}$	É a menor carga de pressão disponível na entrada de uma VRP na posição angular (J) para a estratégia de monitoramento total
$h_{S(i,J)}$	matriz gerada pela distribuição de carga de pressão sem o uso de inversor de frequência
$h_{S(i_p,J)}$	É o menor valor de carga de pressão disponível na entrada de uma VRP na posição angular (J), no ponto ideal
$h_{P(i,J)}$	matriz gerada pela distribuição de carga de pressão da estratégia localização otimizada (P)
$h_{EO(i,J)}$	matriz gerada pela distribuição de carga de pressão da estratégia de monitoramento otimizado das extremidades (E)
$h_p$	maior valor de carga de pressão observado na posição $i_p$ .
$h_{T(i,J)}$	matriz gerada pela distribuição de carga de pressão para o monitoramento total (T)
$h_{E(i,J)}$	matriz gerada pela distribuição de carga de pressão do monitoramento das extremidades (E)
<b>HMT</b>	altura manométrica total
<b>HMT<sub>1</sub></b>	altura manométrica na condição 1
<b>HMT<sub>2</sub></b>	altura manométrica na condição 2
<b>HMT<sub>w(J)</sub></b>	altura manométrica total de acordo com a estratégia e posição angular.
<b>HMT<sub>E(J)</sub></b>	Nova altura manométrica total mais adequada para cada posição angular considerada para o monitoramento das extremidades.
<b>HMT<sub>EO(J)</sub></b>	Nova altura manométrica total mais adequada para cada posição angular considerada para o monitoramento otimizado das extremidades.
<b>HMT<sub>S(J)</sub></b>	Altura manométrica total retirada através da diferença entre o valor de altura manométrica na entrada da bomba e saída da bomba para a simulação sem uso de inversor de frequência
<b>HMT<sub>P(J)</sub></b>	Nova altura manométrica total (m) mais adequada para cada posição angular considerada para a estratégia de monitoramento com posicionamento otimizado (P)
<b>i</b>	identificação de cada emissor na linha lateral do pivô central
<b>J</b>	Posição angular onde J (1 a 36)
<b>k<sub>d</sub></b>	coeficiente de descarga.

<b>K</b>	Carregamento
<b>M<sub>i</sub></b>	média dos valores de carga de pressão para cada localização de emissor na linha lateral
<b>N<sub>s</sub></b>	Número de saídas do pivô central
<b>N</b>	nova rotação
<b>N<sub>n</sub></b>	rotação nominal
<b>P</b>	Estratégia do monitoramento com posicionamento otimizado.
<b>P<sub>1</sub></b>	Potência motriz na condição 1
<b>P<sub>2</sub></b>	Potência motriz na condição 2
<b>PEA<sub>w(J)</sub></b>	Potência Elétrica Ativa de acordo com a estratégia e posição angular
<b>P<sub>mecn(J)</sub></b>	Potência mecânica no eixo da bomba
<b>P<sub>N</sub></b>	Potência Nominal
<b>Q</b>	Vazão bombeada de projeto
<b>Q1</b>	Vazão na condição 1
<b>Q2</b>	Vazão na condição 2
<b>Q<sub>w(J)</sub></b>	vazão de acordo com estratégia e posição angular
<b>q<sub>e</sub></b>	vazão do emissor
<b>S</b>	Pivô central operando sem o uso do inversor de frequência
<b>T</b>	Estratégia do monitoramento total
<b>V</b>	Velocidade do escoamento
<b>VRP</b>	Válvula reguladora de pressão
<b>w</b>	Monitoramento ou a estratégia que estou adotando (S, T, P, E, EO)
<b>θ</b>	Posições angulares, variando de 10 ° a 360 °
<b>α<sub>w(J)</sub></b>	razão entre a velocidade de rotação variável (desejada) e a velocidade de rotação fixa, onde w é a estratégia e J posição angular
<b>α<sub>S(J)</sub></b>	razão entre a velocidade de rotação variável (desejada) e a velocidade de rotação fixa para o pivô central operando sem o uso de inversor de frequência, tendo valor usual determinado pelo EPANET 2.2 igual a 1
<b>α<sub>E(J)</sub></b>	razão entre a velocidade de rotação variável (desejada) e a velocidade de rotação fixa valores de α determinados para o pivô central para o monitoramento das extremidades

$\alpha_{T(J)}$	razão entre a velocidade de rotação variável (desejada) e a velocidade de rotação fixa determinados para o pivô central operando para a estratégia de monitoramento total
$\alpha_{EI(J)}$	razão entre a velocidade de rotação variável (desejada) e a velocidade de rotação fixa para o pivô central operando para a estratégia de monitoramento otimizado das extremidades
$\alpha_{P(J)}$	razão entre a velocidade de rotação variável (desejada) e a velocidade de rotação fixa para o pivô central para a estratégia com posicionamento otimizado
$\gamma$	Peso específico da água
$\eta_{m,w(J)}$	Rendimento do motor ( $0 \leq \eta_{m,w(J)} \leq 1$ ) de acordo com a estratégia e posição angular
$\eta_{b,w(J)}$	Rendimento da bomba ( $0 \leq \eta_{b,w(J)} \leq 1$ ) de acordo com a estratégia e posição angular
$\eta_i$	Rendimento do inversor ( $0 \leq \eta_i \leq 1$ )

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	20
2.1	Bombas centrífugas .....	20
2.1.1	Caracterização das bombas centrífugas.....	21
2.2	Operação de bombas centrífugas com velocidade variável .....	22
2.3	Motores elétricos.....	24
2.4	Inversor de frequência .....	25
2.4.1	Composição do inversor de frequência .....	26
2.4.2	Inversor de frequência operando em sistemas de irrigação do tipo pivô central... .....	28
2.5	Válvula reguladora de pressão.....	30
2.6	Transmissor/Transdutor de pressão.....	31
2.7	Modelagem matemática aplicada a irrigação .....	32
2.7.1	EPANET 2.2.....	33
3	MATERIAL E MÉTODOS .....	35
3.1	Dados dos pivôs centrais .....	35
3.2 S	Simulações no EPANET 2.2 .....	36
3.3	Determinação do coeficiente de descarga do canhão final, válvula reguladora de pressão (VRP) e perda de carga da mangueira do canhão final. ....	38
3.4	Curvas características das bombas e determinação da nova velocidade de rotação.....	40
3.5	Sem o uso do Inversor de Frequência (S).....	42
3.6	Monitoramento Total (T).....	43
3.7	Estratégia de monitoramento com Posicionamento Otimizado (P).....	44
3.8	Estratégia de monitoramento Otimizado das Extremidades (EO).....	46
3.9	Monitoramento das Extremidades (E) .....	48
3.10	Análise do consumo de energia elétrica.....	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	54
5	CONCLUSÃO .....	70
	REFERÊNCIAS .....	71
	ANEXOS .....	75

## 1 INTRODUÇÃO

Decorrentes do constante aumento da demanda por energia, as elevações das tarifas de consumo de energia elétrica tornam o gasto com energia elétrica uma importante componente dos custos de produção da agricultura irrigada (BOYER *et al.*, 2014; BARBOSA *et al.*, 2018).

O custo da energia elétrica ativa consumida por uma unidade de bombeamento é determinado pelos valores das tarifas sobre o consumo de energia elétrica ativa, que são praticados pelas concessionárias de distribuição de energia (R\$/kWh), e pelo produto entre o volume de água bombeada ( $m^3$ ) e o consumo específico médio da unidade de bombeamento, que é expresso em quilo Watt hora por metro cúbico de água bombeada ( $kWh/m^3$ ). Por sua vez, o consumo específico de energia de uma unidade de bombeamento ( $kWh/m^3$ ) é diretamente proporcional ao valor da altura manométrica total fornecida pela unidade de bombeamento, em Newton metro por Newton de água bombeada (N.m/N) e inversamente proporcional ao rendimento global da unidade de bombeamento.

Desta forma, na agricultura irrigada, três estratégias contribuem para a redução dos gastos com o consumo de energia elétrica: (i) o uso mais eficiente da água, que permite reduzir o volume bombeado de água ( $m^3$ ); (ii) o aproveitamento máximo dos horários nos quais as tarifas (R\$/kWh) de consumo de energia praticadas pelas concessionárias são menores; e (iii) pela adoção de práticas que permitam reduzir o valor o consumo específico de energia da unidade de bombeamento ( $kWh/m^3$ ).

A introdução do uso de inversores de frequência para controle da velocidade de rotação das unidades de bombeamento de sistemas de irrigação, pode resultar em reduções significativas no consumo específico de energia ( $kWh/m^3$ ) destas unidades, em relação ao consumo específico de energia das unidades de bombeamento que operam com velocidade fixa de rotação. Sob regime de vazão constante, a redução na velocidade de rotação de uma unidade de bombeamento causa a redução no valor da altura manométrica total fornecida. Quando esta redução no valor da altura manométrica ocorre sem grandes alterações na eficiência global da unidade de bombeamento, também ocorre redução no valor seu consumo específico de energia ( $kWh/m^3$ ), com conseqüente redução no consumo de energia elétrica ativa e nos gastos com consumo de energia elétrica ativa.

Nos equipamentos do tipo pivô central que irrigam áreas de topografia acidentada com uma unidade de bombeamento que opera com velocidade fixa de rotação, a unidade de bombeamento é dimensionada para suprir o mesmo valor máximo de altura manométrica total, em todas as posições angulares assumidas pela linha lateral móvel (BRAR *et al.*, 2017).

Portanto para evitar que os valores excessivos de pressão possam ser transferidos aos bocais dos emissores, alterando a vazão dos mesmos, válvulas reguladoras de pressão são instaladas na base de entrada de cada um dos emissores.

O estudo de Hanson *et al.*, (1996), é um dos pioneiros na determinação da redução do consumo de energia que pode ser alcançada com a introdução de uso de inversores de frequência nas unidades de bombeamento dos sistemas de irrigação. Tarifas de consumo de energia elevadas, elevado número de horas de operação da unidade de bombeamento e grandes flutuação nos valores de vazão ou altura manométrica requeridos da unidade de bombeamento, são fatores que contribuem para a viabilidade econômica da introdução do uso de inversores de frequência (KING; WALL, 2000).

Diversos estudos (CAMPANA *et al.*, 2000; NERYS *et al.*, 2006, PEREIRA *et al.*, 2013; BRAR, 2015; BAPTISTA *et al.*, 2019; ALMEIDA *et al.*, 2021), têm demonstrado que, em pivôs centrais que operam em áreas de topografia acidentada e que tem a sua unidade de bombeamento acionada por um motor elétrico, a introdução de inversores de frequência pode resultar em redução significativa do consumo de energia elétrica ativa. No entanto, o controle da velocidade de rotação da unidade de bombeamento deve ser feito de forma muito criteriosa.

Conforme destaca Brar (2015), a redução excessiva da velocidade de rotação da unidade de bombeamento pode reduzir excessivamente a pressão disponível na entrada de alguns emissores da linha lateral, reduzindo a vazão aplicada por estes emissores, com conseqüente redução da uniformidade de aplicação de água e da produtividade da cultura irrigada. Sendo, portanto, muito importante que seja estabelecida uma estratégia adequada para controle de velocidade de unidade de bombeamento.

Diferentes estratégias têm sido utilizadas para controle da velocidade de rotação da unidade de bombeamento. O sistema de controle de velocidade pode ser baseado em informações sobre a posição angular da linha lateral na área irrigada (PEREIRA *et al.*, 2013), ou informações de valores de pressão determinados por meio de transdutores de pressão instalados ao longo da linha lateral (KING; WALL, 2000; NERYS *et al.*, 2006).

Nerys *et al.* (2006) utilizaram dois transdutores instalados nas extremidades da linha lateral móvel, sendo que apenas o sinal correspondente ao menor dos dois valores medidos era enviado ao inversor. Nerys *et al.* (2006) utilizaram como valor de referência de sinal a ser enviado pelo transdutor quando a pressão medida é pouco superior a pressão nominal da válvula reguladora de pressão. King e Wall (2000) utilizaram as informações de transdutores de pressão instalados nas torres 6 e 10 de um pivô de dez torres e 392 m de comprimento. Brar *et al.* (2019) fizeram a análise de 1000 pivôs instalados em *Nebraska* que indicou que a posição ideal de

instalação de um transmissor deve ser determinada pela análise de cada pivô, destacando que os resultados das análises dos 1000 pivôs de *Nebraska* não confirmam a sugestão dos folhetos comerciais da indústria de equipamentos de irrigação, que têm optado pela instalação de transdutores nas extremidades da linha lateral.

Os objetivos deste estudo foram: simular a distribuição espacial da carga da pressão na linha lateral de dois sistemas de irrigação do tipo pivô central; criar as estratégias de Monitoramento Otimizado das Extremidades (EO), Monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) para o manejo do consumo de energia de pivôs centrais, operando em área de topografia acidentada, que asseguram a qualidade da irrigação com redução do consumo de energia em relação à operação com base na velocidade de rotação da bomba centrífuga.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

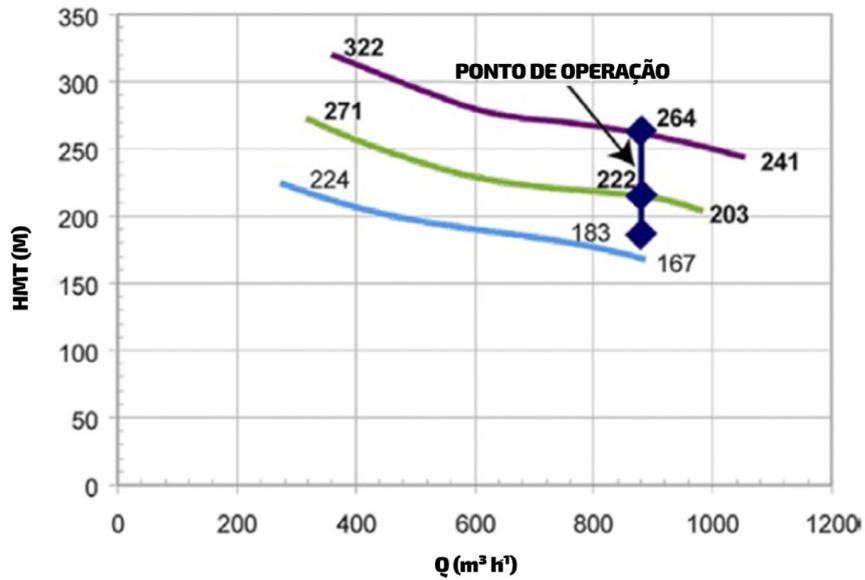
### 2.1 Bombas centrífugas

As bombas hidráulicas convertem a energia mecânica recebida de um motor, em energia hidráulica, na forma de pressão e energia cinética. Sendo assim, as bombas convertem trabalho mecânico em energia de fluido e esse trabalho pode ser de uma fonte energética qualquer, sendo muito utilizado o motor elétrico devido a sua alta eficiência e larga faixa de potência. Essas bombas podem ser usadas para diferentes funções, em que se destacam: irrigação, sistemas de captação e saneamento, dentre outros. Por terem características distintas em sua fabricação e montagem, essas bombas centrífugas podem ser classificadas quanto a construção, número de rotores e trajetória do fluido. Ao número de rotores podem ser classificadas como simples ou de multiestágios. Com relação à trajetória podem ser classificadas como radiais, axiais e mistas e quanto à carcaça podem ser bipartidas no sentido vertical ou horizontal (GOMES, 2013).

As bombas possuem curvas características que podem ser expressas através de gráficos, que são as relações de altura manométrica total (HMT) e a vazão (Q), potência (Pot) e vazão (Q), e NPSH requerido e vazão (Q), sendo todas essas plotadas e publicadas pelos fabricantes nos catálogos de cada bomba. Dentre essas relações há um destaque para a relação altura manométrica total e a vazão, o que a caracteriza como a curva da bomba (GOMES, 2013).

Operar bombas com a vazão de projeto mantida constante sem o uso de controladores de pressão, requer que, mesmo com variação da pressão e da perda de carga, a vazão vai se manter. Operando dessa forma, quando o pivô central se encontra ascendente tem-se que no último emissor da linha lateral móvel, detém-se o menor valor de pressão, enquanto na bomba tem-se o maior valor de pressão. Para o caso descendentes as pressões ao longo da linha lateral móvel aumentam conforme for maior o desnível, reduzindo a pressão na bomba. A diferença na elevação do terreno, pressões necessárias para cada emissor, perda de carga da tubulação, geram na bomba uma exigência de fornecer pressões diferentes para manter a vazão constante. Pivôs centrais podem operar dessa forma, como demonstrado na Figura 1, em que curva da bomba e do sistema, tem um ponto de operação com vazão constante (USDA, 2014).

Figura 1 – Curva da bomba e curva do sistema com pivô central operando com vazão constante.

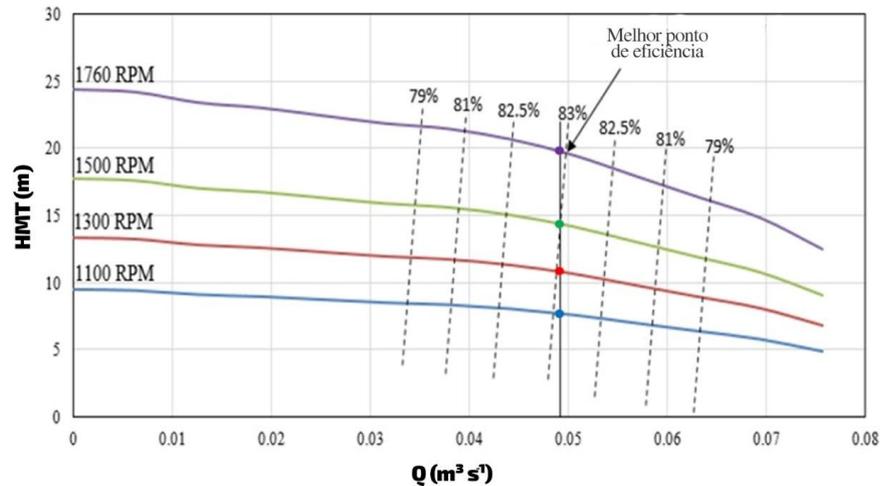


Fonte: Adaptado de USDA (2014).

### 2.1.1 Caracterização das bombas centrífugas

O ponto de operação de uma bomba centrífuga em relação a tubulação é determinado através da curva da bomba e a curva do sistema (BERNARDO, 1989; ANDRADE; ALLEN, 1997; CARVALHO, 1999) como representado na Figura 2, sendo que a curva do sistema é caracterizada pela variação da altura manométrica total com a vazão (MATTOS; FALCO, 1998).

Figura 2 - Curva da bomba e melhor ponto de eficiência da bomba operando com variação da velocidade de rotação.



Fonte: Adaptado de Brar *et al.* (2017).

De acordo com Gomes (2013), operar em qualquer outro ponto diferente do ponto de operação só pode ser feito se as curvas forem alteradas, individualmente ou ambas. As formas de efetuar essa mudança podem ser modificando o ponto de operação na curva do sistema, dessa forma a altura geométrica ou as perdas de carga são alteradas no sistema, ou sendo feitas com a mudança do diâmetro da tubulação, adicionando acessórios ou realizando o fechamento parcial do registro de uma válvula na saída da bomba.

## 2.2 Operação de bombas centrífugas com velocidade variável

Operar bombas em velocidades diferentes da de projeto, deve obedecer a alterações no comportamento da bomba que podem ser previstas pelas relações de semelhança. Parte-se do pressuposto que bombas geometricamente semelhantes trabalham em condições de semelhança, desde que ela mantenha a eficiência (PORTO, 2006). Mas no caso particular em que há modificação somente da velocidade de rotação da bomba, as relações de semelhança, podem ser derivadas para as leis de similaridade (Rateux). Essas leis traçam que há proporcionalidade entre os valores de vazão,  $Q$ , altura manométrica (HMT), e potência (Pot), bem como com a rotação  $N$ . (MESQUITA *et al.*, 2006).

Segundo Gomes (2013) e o USDA (2014), as equações da similaridade podem ser descritas abaixo:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N}{N_n} \quad (1)$$

$$\frac{HMT_2}{HMT_1} = \frac{(N)^2}{(N_n)^2} \quad (2)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{(N)^3}{(N_n)^3} \quad (3)$$

$N_n$  = Rotação na condição nominal (RPM);

$N$  = Rotação na nova condição (RPM);

$Q_1$  = Vazão na condição 1 ( $m^3h^{-1}$ );

$Q_2$  = Vazão na condição 2 ( $m^3h^{-1}$ );

$HMT_1$  = Altura manométrica na condição 1 (m);

$HMT_2$  = Altura manométrica na condição 2 (m);

$P_1$  = Potência motriz na condição 1 (kW);

$P_2$  = Potência motriz na condição 2 (kW).

Em que as unidades podem ser alteradas desde que obedeça a condição para variável 1 e 2.

Ao usar as leis de similaridade, deve se ter atenção às modificações a serem feitas sobre a curva do sistema. Ao fazer as leis, deve se atentar a nova mudança nas curvas características do sistema (CARLSON, 2000; MIRCEVSKI; KOSTIC; ANDONOV,1998).

Segundo Briceño-León *et al.* (2021), quando uma bomba gira com diferentes velocidades de rotação, a curva que representa a altura manométrica total e a curva de eficiência da bomba são afetadas pela velocidade de rotação, velocidade essa definida pelo termo ( $\alpha$ ). O termo ( $\alpha$ ) é a razão entre a velocidade de rotação variável (desejada) e a velocidade de rotação fixa.

$$\alpha = \frac{N}{N_n} \quad (4)$$

$N$  – Nova velocidade de rotação (rpm);

$N_n$  – velocidade de rotação nominal (rpm);

$\alpha_{w(J)}$  - razão entre a velocidade de rotação variável (desejada) e a velocidade de rotação fixa.

Ainda segundo Briceño-León *et al.* (2021), a curva que representa a altura manométrica total e a curva de eficiência da bomba afetadas pela variação da velocidade de rotação, estão expressas nas Equações 5 e 6.

$$HMT=A(\alpha)^2-\alpha^{2-C}.B.\left(\frac{Q}{n}\right)^C \quad (5)$$

HMT = altura manométrica total de acordo com a estratégia e posição angular (m);

$\alpha$  = é a nova velocidade de rotação dividida pela rotação nominal.

A, B, C = coeficientes da equação da curva da bomba;

Q= vazão bombeada ( $m^3h^{-1}$ ).

n =é o número de bombas.

$$\eta = c. \left(\frac{Q}{\alpha.n}\right) -b. \left(\frac{Q}{\alpha.n}\right)^2 \quad (6)$$

$\eta$  = rendimento da bomba;

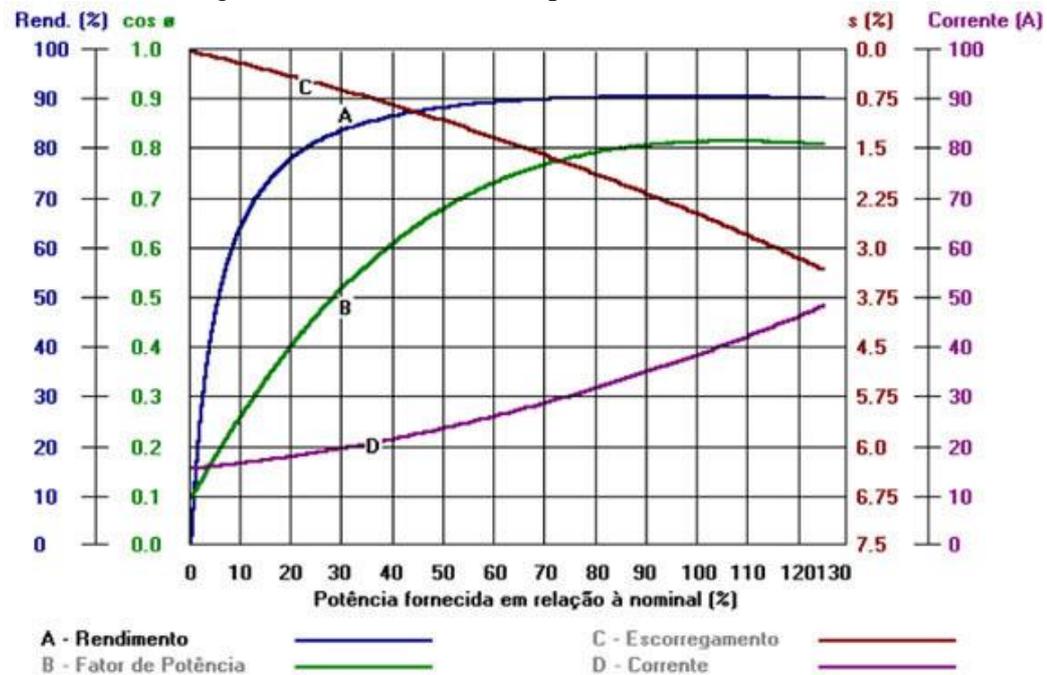
c, b = coeficientes da equação da curva do rendimento da bomba;

### 2.3 Motores elétricos

De acordo com o a publicação do Guia de Especificação de Motores Elétricos da WEG (2021), motor elétrico é a máquina destinada a transformar energia elétrica em energia mecânica. Dentre todos os tipos de motores disponíveis, o de indução tem sido o mais utilizado devido as suas vantagens, tais como baixo custo, facilidade de transporte, limpeza e comandos simplificados. O princípio de funcionamento é baseado em velocidade constante, mas é variável de acordo com a carga mecânica aplicada no eixo. O controle da velocidade dos motores de indução tem o auxílio de inversores de frequência. Os motores elétricos possuem características físicas, construtivas, operação, potência, fator de serviço, tensão, dentre outras, que os diferem.

Além disso, os motores possuem curvas características de desempenho mostrando o fator de potência, corrente, rendimento e escorregamento (FIGURA 3).

Figura 3 – Curvas de desempenho do motor elétrico.



Fonte: WEG (2000).

Nas instalações de bombeamento, os motores que não possuem controladores de velocidade de rotação operam em velocidade constante durante todo o funcionamento do sistema, e em muitos casos, podem estar operando superdimensionados em alguns momentos. Por serem equipamentos que consomem muita energia elétrica dentro do empreendimento, o mal dimensionamento e a operação dos mesmos sem equipamentos de controle acarretará um maior consumo da energia elétrica (CAMPANA, 2000).

## 2.4 Inversor de frequência

O inversor de frequência trabalha no controle do motor variando a frequência e atuando na tensão de saída, fazendo com que haja compatibilidade com a frequência e, com isso, não ocorra o aquecimento além do permitido no motor (GOMES, 2013).

De acordo com Franchi (2008) os inversores são divididos em dois grupos: inversores de tensão e inversores de corrente. Os conversores de corrente podem ter uma fonte de corrente CA (corrente alternada) retificada, uma fonte CC (corrente contínua) ou um indutor. Contrário a isso, os inversores de tensão têm uma entrada fonte CA retificada, uma fonte CC ou um

capacitor de valor elevado para substituir a fonte. Os inversores são equipamentos empregados para alimentação de motores de baixa tensão onde há necessidade de variação da velocidade, operando assim, como uma interface entre a rede e o motor (WEG, 2005).

Muito além de controlar a velocidade de rotação do motor, os inversores de frequência têm a função de manter o torque constante, fazendo com que não ocorram alterações da rotação quando o motor estiver com carga (AZEVEDO, 2003).

Sistemas operando fora do ponto de trabalho desejado, ou seja, com rotação constante e válvula de controle superdimensionados, ocasionam muito desperdício da energia elétrica na operação. Com isso, o uso do inversor de frequência na indústria em sistemas de bombeamento com o objetivo de mudar a rotação do motor, tem um viés econômico muito impactante, pois ocasiona a redução do consumo energético, em comparação com outros procedimentos, como fechamento de registro e/ou válvulas (TIAGO FILHO, 1996). A regulação da velocidade do motor, controle de tensão e frequência, aumentam a capacidade dos motores de corrente alternada. Dentre todos os efeitos benéficos a essa prática, operar em velocidades baixas significa ciclos menores dos rolamentos, ventoinhas e outros elementos, aumentando a vida útil dos mesmos (ARAÚJO, 2003).

O benefício atrelado ao uso desse aparelho é a economia nos custos com energia elétrica, pois levará a uma redução na potência consumida pelo motor elétrico (HANSON; WEIGAND; ORLOFF, 1996). Segundo Gomes (2013) algumas outras vantagens para se ter um inversor de frequência em um sistema de bombeamento são: o aumento da confiabilidade do sistema, partida e parada suaves, corrente do motor elétrico controlada, economia de energia, vida útil da bomba, mancais e vedações, automação do sistema, diminuição da necessidade de válvulas para partir e parar o bombeamento e custos operacionais menores. A aplicação do inversor em diversas pesquisas tem demonstrado resultados satisfatórios, dentre eles, quando ocorre a redução da potência consumida pela ação do inversor de frequência gerando consumo de energia elétrica menor, comparado a um sistema sem o inversor de frequência (HANSON; WEIGAND; ORLOFF, 1996).

#### **2.4.1 Composição do inversor de frequência**

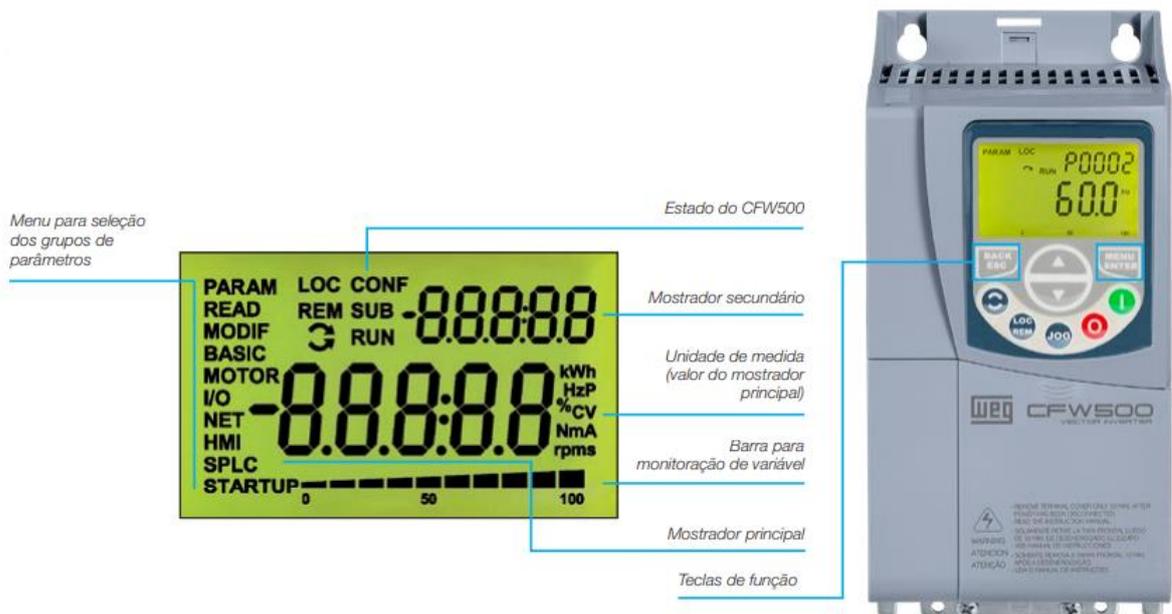
Inversor de frequência tem uma divisão em quatro blocos: um retificador, um circuito intermediário, um inversor e um circuito de controle, que geralmente é um microprocessador. O retificador pega o sinal da tensão alternada senoidal e o transforma em corrente contínua que é regulada na entrada do inversor. A regulação de frequência de saída do motor pode ser feita

através do inversor, onde possibilita a modulação do sinal e o envio do mesmo de forma com que, de acordo com os parâmetros de funcionamento determinados, escolhe o que for ideal no momento do funcionamento do sistema (WEG, 2009).

Os inversores de frequência contêm algumas funções essenciais que podem ter ou não em alguns inversores, mas, para o visor do inversor de frequência especificado na Figura 4 se destacam, que é a interface com seu circuito, facilitando a operação do usuário. Através dela, o operador determina a parametrização do inversor e observa o visor se seleção. Parametrização essa feita pela função JOG, que possibilita que haja uma rampa de aceleração ou desaceleração entre cada rotação pré-definida e faz com que o conjunto trabalhe dentro de sua faixa de operação desejada, PROG botão utilizado para acessar e habilitar as programações desejadas, teclas de seleção para incrementar valores no visor, botões de ligar e desligar e teclas de função (SIQUEIRA; SALES, 2016).

Figura 4 - Interface de um inversor de frequência CFW500.

#### Interface de Operação (IHM)



Fonte: WEG (2022).

Além das funções acima, os inversos apresentam a função *multispeed*, essa detém 3 entradas digitais que após o processo de comutação podem trabalhar com 8 velocidades variáveis. O inversor parametrizado permanece em uma das faixas de operação delimitadas com sistema de rotação estável ou por alguma das variáveis delimitadas na programação (SIQUEIRA; SALES, 2016).

A Figura 5 ilustra a função *multispeed* em que os valores DI4, DI5, DI6 são as entradas digitais. 0V representa que ele não opera naquela referência de velocidade programada ou entrada enquanto 24 V o inversor opera na entrada e velocidade associada. Para o inversor operando com 4 velocidades somente as entradas DI5 e DI4 operam em algumas programações. Para 8 velocidades todas as entradas operam sendo que a entrada DI6 começa a operar em todas as velocidades, e as demais operam somente em algumas velocidades (SIQUEIRA; SALES, 2016).

Figura 5 - Referências e saídas no multispeed.

DI6	DI5	DI4	Ref. de Veloc.
0V	0V	0V	P124
0V	0V	24V	P125
0V	24V	0V	P126
0V	24V	24V	P127
24V	0V	0V	P128
24V	0V	24V	P129
24V	24V	0V	P130
24V	24V	24V	P131

Fonte: WEG (2002).

#### 2.4.2 Inversor de frequência operando em sistemas de irrigação do tipo pivô central

Em sistemas do tipo pivô central quando não se tem o uso de válvulas reguladoras de pressão, tem-se durante todo o movimento do pivô, alturas manométricas variáveis por toda a topografia. Assim, quando o pivô central estiver operando na menor altura manométrica, a potência solicitada no motor será mínima. Contrário a essa situação, a potência máxima ocorre quando está na maior altura manométrica (CAMPANA; OLIVEIRA FILHO; SOARES, 2000).

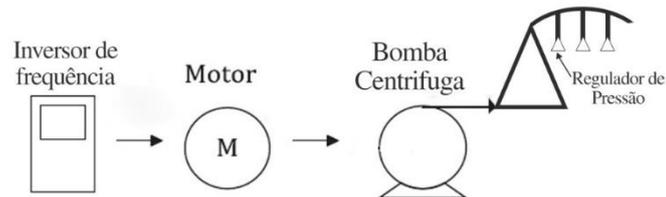
Há um componente denominado transdutor de pressão na linha móvel do pivô central, com função de envio do sinal de controle para o inversor. Desta forma, um sinal de 0-10 bar da linha de recalque corresponderia a um sinal, por exemplo, de 4-20 mA do sensor de pressão ou um transmissor de pressão. O *set-point* seria um valor de pressão especificado pelo usuário no inversor de frequência. Quando o controlador capta um aumento da pressão na rede faz com que haja a redução da velocidade do motor para manter aquele valor de pressão programado. (MESQUITA *et al.*, 2006).

Um ponto a se ter atenção ao usar inversores de frequência é se ele tem funções como parar a bomba sem desligar o motor elétrico quando o sinal for mínimo, se permite em suas operações regulagens automáticas de operação com cargas quadráticas (torque varia com

quarado da rotação), se o inversor após parar o motor devido ao sinal mínimo, receber um novo sinal coloca a bomba em funcionamento e em regime de velocidade variável. (DANFOSS, 2006).

Segundo Araújo (2003), ao avaliar um sistema de irrigação com rotação constante e rotação variável e com o uso de inversor de frequência e um transdutor de pressão, o inversor de frequência e o transdutor de pressão atuam variando a rotação do conjunto motobomba adequando a pressão à vazão requerida pelo sistema. O esquema na Figura 6 ilustra uma unidade de bombeamento com uso de inversor de frequência em um esquema de operação de um pivô central.

Figura 6 – Unidade de bombeamento com uso de inversor de frequência em um esquema de operação de um pivô central.

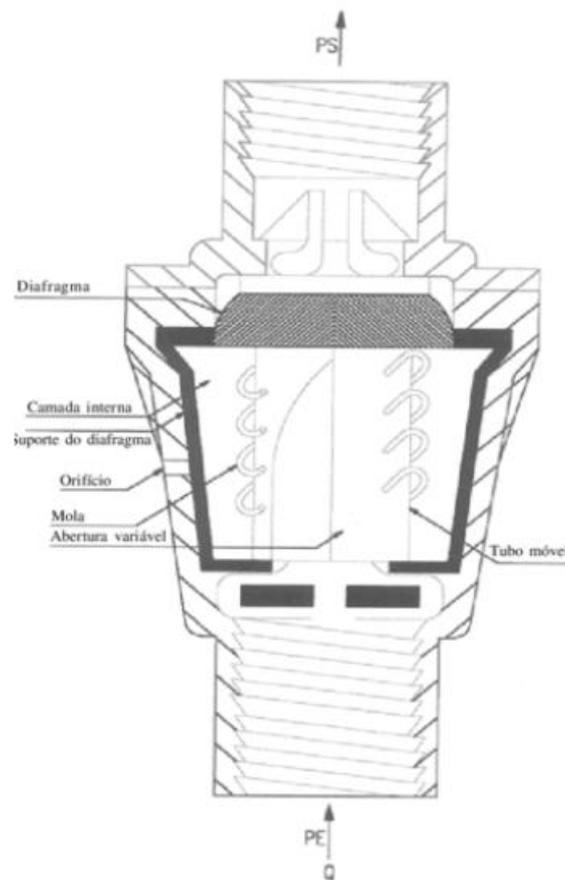


Fonte: Do autor (2023).

## 2.5 Válvula reguladora de pressão

As válvulas reguladoras de pressão associadas a emissores em pivôs centrais, mostrado na Figura 7, são itens utilizados para regular a pressão de saída numa faixa delimitada de pressão de entrada e vazão.

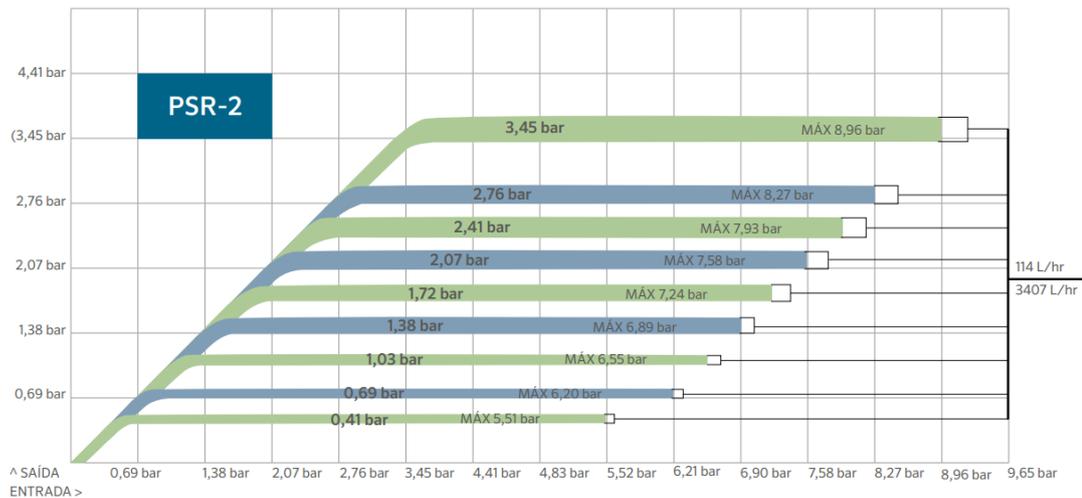
Figura 7 – Esquema da válvula reguladora de pressão.



Fonte: Lima (2013).

Essas válvulas possuem características hidráulicas delimitadas através de curva de desempenho, que correlaciona a pressão de saída pela pressão de entrada e da vazão como apresentado na Figura 8 (LIMA *et al.*, 2013). Assim, a pressão em um emissor pode ter variações de acordo com os fatores hidráulicos e/ou topográficos, sendo assim, um regulador busca manter constante a pressão de saída, independentemente da pressão de entrada e da vazão (VON BERNUTH; BAIRD, 1990).

Figura 8 – A curva de desempenho do regulador PSR-2 ilustra o funcionamento do regulador de pressão dentro da faixa de pressão e vazão de entrada do modelo.



Fonte: SENNINGER (2023).

O princípio de construção mais comum para esse equipamento, parte de uma mola com uma carcaça que aloja um êmbolo. O funcionamento da válvula é através do êmbolo que é empurrado por uma mola que busca permanecê-la na posição de máxima abertura, desta forma, quando a pressão existente na água abaixo do regulador atua sobre a superfície do fixador da mola, e essa pressão é menor que a do regulador, a mola acaba mantendo em aberto o êmbolo e a água passa com uma baixa perda de carga. No caso da pressão atuante ser maior, ela acaba criando uma força que vence a da mola fazendo com que o êmbolo se feche parcialmente, assim aumenta a perda de carga até fazer com que a pressão fique próxima a do regulador de pressão (TARJUELO, 1994).

## 2.6 Transmissor/Transdutor de pressão

O transmissor de pressão (FIGURA 9) é um dispositivo com a capacidade de medir a pressão diferencial. Desta forma é um dispositivo que possui grande atuação nas áreas de automação e engenharias (GARCIAIBARRA *et al.*, 2013).

Transmissores de pressão podem ser encontrados gerando sinais como 4-20mA, 10-50mA, 1-5V ou um sinal digital como o protocolo TCP-IP. Para um sinal de 4-20 mA o benefício maior é o de detectar avarias, como rompimento de fios da transmissão do sinal mais facilmente. Isso ocorre, pois, sinais de corrente são menos suscetíveis a ruídos do que sinais de tensão e têm grande potencial de uso em meio rural visto que não são limitados pela distância.

Por isso, o uso do 4 mA como referência de uso, já que um valor abaixo de 4mA indica que houve uma queda na transmissão do sinal (SENAI, 2015).

O funcionamento do transmissor ocorre com o envio de um sinal do sensor que já é processado digitalmente no padrão de corrente de 4-20 mA, desta forma, o transmissor de pressão possui um conversor tensão-corrente o qual também é compensado termicamente dentro do algoritmo do dispositivo, que pode fazer a alteração de um dado de mV para mA. Essa compensação para os aparelhos transmissores fornece os valores padrões para que o transmissor de pressão possa trabalhar, permitindo assim, que ocorra a calibração da saída de acordo com o uso e valor de sinal que deseja enviar (GARCIAIBARRA *et al.*, 2013).

Figura 9 – Transdutor de pressão.



Fonte: OMEGA (2023).

## 2.7 Modelagem matemática aplicada a irrigação

Modelagem hidráulica estuda o comportamento de redes de distribuição de água, que são ferramentas indispensáveis para o gerenciamento adequado das redes, já que as características presentes nesse sistema podem ser bem detalhadas durante a execução do modelo (DA SILVA; VALADÃO; BARROS, 2007). Desta forma, os modelos de simulação são modelos matemáticos que tem a função de representar todo o sistema estudado e propor alternativas de acordo com as simulações das condições reais que poderiam ocorrer dentro de uma faixa de incertezas, inerentes ao conhecimento (TUCCI, 1998).

### 2.7.1 EPANET 2.2

O EPANET 2.2 foi desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency-EPA) como ilustrado na Figura 10, é uma ferramenta de domínio público, bem flexível, adaptado a simular redes de abastecimento e de irrigação. Aceita as mudanças na simulação, quando necessárias, de dispositivos tais como válvulas, bombas, dentre outros (ROSSMAN, 2000).

O EPANET 2.2 é um programa de computador que disponibiliza ao usuário a oportunidade de poder simular o comportamento hidráulico de um sistema pressurizado de distribuição de água, ao longo do tempo. O sistema analisado e implementado na simulação pode ser composto por uma rede de tubulações (malhada ou ramificada), válvulas, reservatórios de nível fixo e variável e o sistema de bombeamento. O Epanet 2.2 também tem a função de poder simular o comportamento de parâmetros da qualidade da água por toda a extensão da rede de distribuição por um determinado período. Além de todas as funções anteriores, pode auxiliar em analisar alternativas de operação, para contribuir com a qualidade do sistema de abastecimento, para avaliar medidas que auxiliem na diminuição do consumo de energia elétrica das estações de bombeamento (GOMES, 2013).

As equações encontradas e aplicadas nas simulações dentro do *software* que caracterizam as condições de equilíbrio hidráulico da rede num dado instante, podem ser resolvidas pelo Método Gradiente ou Método Nó-Malha, que obtém os valores de pressão, vazão e outros parâmetros (TODINI; PILATI, 1988).

Segundo Coutinho *et al.* (2017), a curva característica da bomba com altura manométrica total (HMT) versus vazão (Q) é gerada pelo EPANET através da inserção do i) ponto de Vazão Mínima (vazão e carga para o ponto de vazão nulo ou mínimo Shutoff); ii) ponto de Vazão de Projeto (vazão e carga para o ponto ótimo de funcionamento) e, iii) ponto de Vazão Máxima (vazão e a carga para o ponto de vazão máximo) ajustando uma equação potencial.

$$HMT = A - B \cdot Q^C \quad (7)$$

HMT= Altura manométrica total (m);

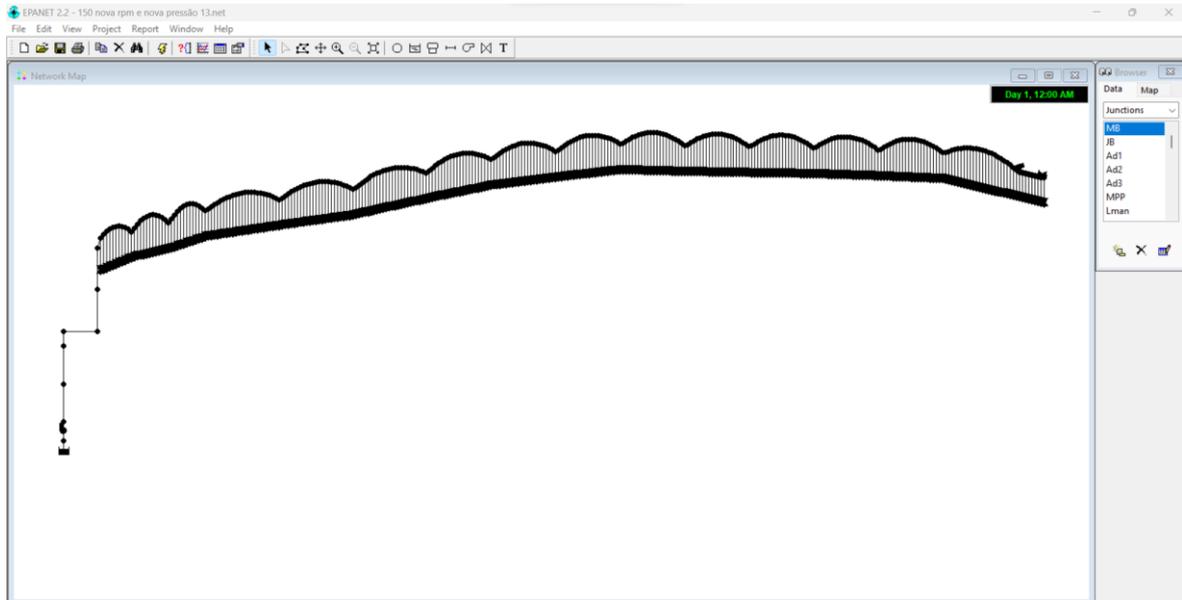
A = Altura manométrica no ponto de shutoff (m);

B, C =Constantes da função de ajuste;

Q = vazão de projeto (m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>).

Como resultados, o EPANET 2.2 mostra ao usuário os dados em vários formatos de visualização, desde mapas da rede com codificação de cores, tabelas de dados, gráficos de séries temporais e gráficos de isolinhas (DA SILVA; VALADÃO; BARROS, 2007).

Figura 10 – Simulação hidráulica do pivô central 1 sem uso do inversor de frequência no EPANET 2.2.



Fonte: Do Autor (2023).

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Dados dos Pivôs Centrais**

O estudo realizado avaliou dois sistemas de irrigação do tipo pivô central, denominados Pivô 1 (localizado na cidade de Vila Propício - GO) e Pivô 2 (localizado na cidade de Formiga - MG).

Os dados topográficos dos dois equipamentos de irrigação do tipo pivô central foram coletados com modelos digitais de elevação (MDE), por meio de imagens de satélite no sistema de coordenadas SIRGAS 2000. O modelo de elevação e determinação das cotas das torres foi gerado seguindo a metodologia descrita por Baptista *et al.* (2019).

Na Tabela 1 podem ser observados os dados para os dois equipamentos do tipo pivô central, pivô 1 e pivô 2, considerados neste estudo.

Tabela 1 - Dados para os equipamentos pivô 1 e pivô 2.

Dados dos pivôs centrais	Pivô central 1	Pivô central 2
Vazão bombeada de projeto (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	396.13	203.36
Altura manométrica total de projeto (m)	120.95	128.48
Rotação de projeto da bomba (rpm)	1750	1750
Desnível do ponto do pivô ao ponto mais alto(m)	24	25
Número de torres	15	7
Pressão na entrada do Pivô (mca)	66.55	50.97
Pressão no extremo da tubulação do Pivô (mca)	13	13
Comprimento total do equipamento (m)	785.12	409.72
Comprimento do lance em balanço (m)	21.03	25
Lâmina bruta a aplicar (mm/dia)	4	8
Tempo máximo de operação diário (h)	21	21
Desnível da motobomba ao centro do pivô (m)	35	35
Perdas diversas (mca)	5.64	8.42
Desnível ponto do pivô ao ponto mais baixo (m)	31	25
Bomba KSB WKL	150/02 2 estágios.	125/3 3estágios
Rendimento da bomba (%)	79	76
Diâmetro do rotor (mm)	360	320
Potência nominal (kW(cv))	185(250)	110(150)
Motor Elétrico	IP55 W22 WEG Trifásico	IP55 W22 WEG Trifásico
Frequência(hz)	60	60
Eficiência (%)	90	90
Número de pólos	4	4
Número de emissores	308	181
Área total irrigada(ha)	207.71	52.74
Canhão final	TWIN MAX 18deg.79	-

Fonte: Do autor (2023).

### 3.2 Simulações no EPANET 2.2

As simulações do funcionamento do sistema de irrigação por pivô central para diferentes posições angulares da linha lateral, foi realizada com o software EPANET 2.2. Para realizar as simulações, foi necessário o uso da ferramenta VSPM (*Variable Speed Pivot Model*) desenvolvida por Baptista *et al.* (2019).

Essa ferramenta possibilitou editar os dados de entrada requeridos pelo EPANET 2.2. O VSPM possui cinco etapas: (i) descrever o sistema de sucção e bombeamento; (ii) caracterização dos elementos que compõe o pivô central; (iii) informar a taxa aparente de aplicação de água, selecionar o tipo de emissor e a pressão regulada pela VRP, além de selecionar as válvulas reguladoras de pressão (VRP) e emissores; (iv) listar as junções e

tubulações para verificação rápida e; (v) geração do arquivo de texto no formato requerido pelo EPANET 2.2.

Para cada posição angular da linha lateral analisada no VSPM foi informado um valor de elevação para cada da torre móvel. Os valores de cotas das torres para cada posição angular da linha lateral do pivô central, bem como os dados do sistema de sucção e bombeamento para os pivôs centrais analisados são apresentados no Anexo A, especificamente nas Tabelas 13 a 18 e nas Figuras 27 a 30, respectivamente.

Para realizar as simulações no EPANET 2.2, cada área irrigada pelo pivô central foi dividida em 36 partes igualmente espaçadas de  $10^\circ$  sendo a angulação  $0^\circ$  o norte geográfico ( $\theta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, \dots, 360^\circ$ ), adotado para cada posição angular “j” o valor de 1 a 36, correspondente aos ângulo de  $10^\circ$  a  $360^\circ$ , respectivamente.

As simulações seguiram uma ordem de estratégias adotadas para controle da velocidade de rotação da unidade de bombeamento do pivô central. Para os dois pivôs analisados, foram adotadas duas estratégias de controle, e para cada estratégia foram realizadas trinta e seis simulações (para cada posição angular da linha lateral), totalizando 144 simulações hidráulicas no EPANET2.2. As estratégias adotadas foram: (i) “Monitoramento Otimizado das Extremidades (EO) da linha móvel”, que abrange transdutores imaginários de pressão instalados à montante do primeiro conjunto VRP-emissor nas extremidades da linha lateral, sendo que apenas o sinal correspondente ao menor dos dois valores lidos é enviado ao inversor, que mantém a velocidade de rotação da bomba de tal forma que o sinal elétrico recebido mantenha um valor igual ao sinal do transdutor quando a pressão lida atinge um valor de referência otimizado, que foi determinado com base na análise da distribuição espacial obtida no monitoramento total (T) e; (ii) “Monitoramento com Posicionamento Otimizado (P)” da linha móvel, que abrange um único transdutor imaginário à montante do primeiro conjunto VRP-emissor, com posição de instalação na lateral e valor de referência do sinal para controle da velocidade pelo inversor determinados com base na análise da distribuição especial obtida no monitoramento total (T).

### 3.3 Determinação do coeficiente de descarga do canhão final, válvula reguladora de pressão (VRP) e perda de carga da mangueira do canhão final

Para alimentar as simulações hidráulicas do pivô central Vila Propício no EPANET2.2, visto que este opera com canhão final, foi necessário a determinação do coeficiente de descarga do canhão final, do valor da pressão regulada pela VRP do canhão final e do coeficiente da perda de carga localizada da mangueira do canhão final.

O valor do coeficiente de descarga  $k_d$  do canhão final foi determinado seguindo a Equação 8 (FRIZZONE *et al.*, 2018).

$$k_d = \frac{q_e}{\sqrt{h_{vrp}}} \quad (8)$$

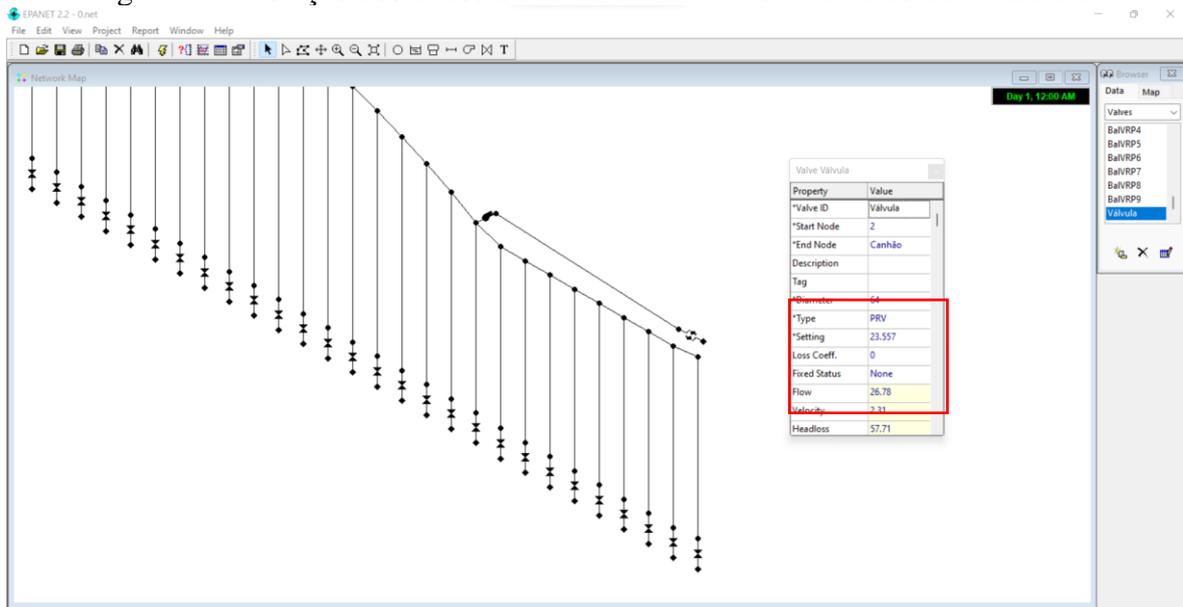
$q_e$  = vazão do emissor em  $m^3h^{-1}$ ;

$h_{vrp}$  = carga de pressão regulada pela válvula VRP m;

$k_d$  = coeficiente de descarga  $m^{2,5}h^{-1}$ .

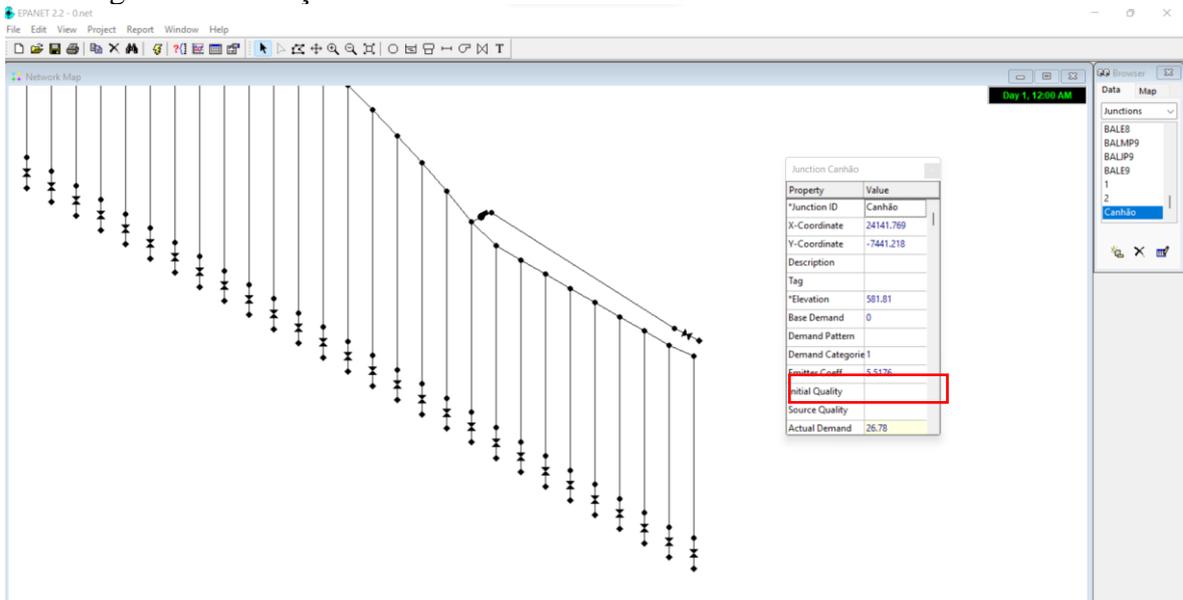
Os valores determinados do coeficiente de descarga do emissor (canhão final), e o coeficiente da perda de carga da mangueira do canhão final, foram inseridos manualmente no EPANET 2.2, como mostrados nas Figuras 11 e 12.

Figura 11 - Inserção dos dados da válvula VRP na aba Valve do EPANET 2.2.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 12 - Inserção dos dados do canhão final na aba Canhão no EPANET 2.2.



Fonte: Do autor (2023).

A Tabela 2 apresenta os dados de entrada do canhão final TWIN MAX 18 do pivô central 1.

Tabela 2 – Dados do canhão final TWIN MAX 18.

Dados do conjunto canhão final	Valores
Diâmetro da VRP (m)	0.064
Setting PRV canhão (m)	23.557
Vazão do Canhão final (m <sup>3</sup> /h)	26.78
Coefficiente de descarga (m <sup>2.5</sup> /h)	5.5176
Comprimento Mangueira(m)	21
Diâmetro Mangueira (m)	0.064
Perda de carga na mangueira(m)	5.2816

Fonte: Do autor (2023)

### 3.4 Curvas características das bombas e Determinação da nova velocidade de rotação

Um das formas de inserção de curvas características de bombas no EPANET 2.2, é informando três pontos de operação: ponto de Vazão Mínima (vazão e carga para o ponto de vazão zero, Shutoff), ponto de Vazão Nominal (vazão e carga para o ponto ótimo de funcionamento), ponto de Vazão Máxima (vazão e a carga para o ponto de vazão máximo). A partir disso, o EPANET 2.2 ajusta uma equação da bomba com o mesmo formato da apresentada na Equação 7 e adaptada na Equação 9.

$$HMT=A_b-B_b.(Q_N)^{c_b} \quad (9)$$

Onde:

HMT = altura manométrica total nominal (m);

$Q_N$  = vazão nominal bombeada (m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>).

$A_b$ ,  $B_b$ ,  $C_b$  = coeficientes de ajuste da equação da curva da bomba determinada pelo EPANET 2.2.

A Tabela 3 apresenta os valores dos coeficientes das curvas das bombas para o pivô central 1 e 2.

Tabela 3 – Valores dos parâmetros da curva da bomba gerados pelo EPANET 2.2 para o pivô central 1 e 2.

Pivô 1		Pivô 2	
Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
A <sub>b</sub>	159.80	A <sub>b</sub>	155.57
B <sub>b</sub>	0.002552	B <sub>b</sub>	0.001705
C <sub>b</sub>	1.61	C <sub>b</sub>	1.82

Fonte: Do autor (2023).

Para as estratégias (i) e (ii) a velocidade de rotação da unidade de bombeamento foi alterada, de acordo com altura manométrica total necessária determinada através da distribuição espacial da pressão ao longo das diferentes posições angulares da linha lateral. Para isso, foi necessário determinar a razão entre a velocidade de rotação variável (desejada) e a razão entre velocidade variável e fixa ( $\alpha_{w(j)}$ ), correspondentes a cada estratégia e posição angular, através da Equação 10 adaptada de Briceño-León *et al.* (2021).

$$HMT_{w(j)} = (\alpha_{w(j)})^2 \cdot (A_b - B_b \cdot (\frac{Q_{w(j)}}{\alpha_{w(j)}})^{C_b}) \quad (10)$$

Onde:

$HMT_{w(j)}$  = altura manométrica total de acordo com a estratégia w e posição angular j (m);

$\alpha_{w(j)}$  = razão entre a velocidade de rotação variável (desejada) e a velocidade de rotação fixa, para estratégia w e posição angular j..

A<sub>b</sub>, B<sub>b</sub>, C<sub>b</sub> = coeficientes de ajuste da equação da curva da bomba;

$Q_{w(j)}$  = vazão de projeto de acordo com estratégia w e posição angular j ( $m^3h^{-1}$ ).

Na Figura 13 é ilustrado a inserção do novo valor de velocidade de rotação no EPANET 2.2.

Figura 13 - Inserção do novo valor de velocidade de rotação (*Speed*) no EPANET 2.2.



Fonte: Do autor (2023).

### 3.5 Sem o uso do inversor de frequência (S)

Esta foi a primeira série de simulações realizadas, com o uso de velocidade fixa da unidade de bombeamento do pivô central, para as 36 posições angulares da linha lateral para os 2 pivôs analisados neste estudo. Nas simulações dessa estratégia, foi possível determinar qual era o ponto de mínima pressão ao longo da linha lateral, para as diferentes posições angulares. A partir disso, foi possível determinar as alturas manométricas mínimas necessárias da unidade de bombeamento para a correta pressurização das VRP, para cada posição angular no Monitoramento Total.

Através dos dados obtidos nas simulações no EPANET 2.2 operando sem o uso do inversor de frequência, foi gerado uma matriz  $h_{S(i,j)}$  onde “i” é a identificação de cada emissor na linha lateral, “j”, a posição angular e os valores de carga de pressão. Para o caso do pivô 1, a matriz foi composta por 308 linhas (emissores) e 36 colunas (posições angulares da linha lateral). Para o caso do pivô 2, a matriz foi composta por 181 linhas (emissores) e 36 colunas (posições angulares da linha lateral).

A regulação da velocidade de rotação do pivô central operando sem o inversor de frequência ( $\alpha_{S(j)}$ ) tem valor usual e constante igual a 1.0 ( $N_1=N_2$ =nominal) no EPANET 2.2.

### 3.6 Monitoramento Total (T)

Monitoramento total (T) da linha móvel, abrange transdutores imaginários de pressão instalados em todos os emissores da linha lateral, sendo que apenas o sinal correspondente ao menor dos valores lidos é enviado ao inversor, que mantém a velocidade de rotação da bomba de tal forma que o sinal elétrico recebido mantenha um valor igual ao sinal do transdutor quando a pressão lida é a nominal das válvulas reguladoras de pressão.

Para a estratégia de monitoramento total (T) foi necessário calcular quais as novas velocidades de rotação ( $\alpha_{T(J)}$ ) para cada posição angular (J), que forneceria a menor altura manométrica na unidade de bombeamento para a correta pressurização das VRP's.

Para isso, foi necessário realizar os cálculos das novas alturas manométricas totais ( $HMT_{T(J)}$ ) que posteriormente foram utilizadas nos cálculos das novas velocidades de rotação  $\alpha_{T(J)}$ . A nova altura manométrica, para cada posição angular, foi determinada através da diferença entre altura manométrica com a unidade de bombeamento à velocidade fixa e o excesso de altura manométrica (EQUAÇÃO 11), que por sua vez foi determinada através da diferença entre a carga de pressão mínima (determinada no uso sem inversor de frequência, eq. 12) e a carga de pressão de regulagem da VRP (EQUAÇÃO 12), para cada posição angular.

$$EHMT_{T(J)} = h_{\min T(J)} - h_{VRP} \quad (11)$$

$$h_{\min T(J)} = \text{Mínimo} (h_{S(1,J)}, h_{S(2,J)}, h_{S(3,J)}, \dots, h_{S(N_s,J)}) \quad (12)$$

$EHMT_{T(J)}$  = Excesso de altura manométrica total de cada posição angular (J), que será dissipado pela válvula reguladora de pressão na posição que tem a menor carga de pressão ( $h_{\min T(J)}$ ) disponível em sua entrada sem a variação de rotação;

$h_{\min T(J)}$  = carga de pressão mínima, determinada na estratégia 1. É a menor carga de pressão disponível na entrada de uma VRP na posição angular (J) para a estratégia de monitoramento completo;

$h_{VRP}$  = Valor de setting da válvula reguladora VRP.

$N_s$  = Número de saídas do pivô central.

$$HMT_{T(J)} = HMT_{S(J)} - EHMT_{T(J)} \quad (13)$$

$HMT_{T(j)}$  = Nova altura manométrica completo (m) mais adequada para cada posição angular considerada para a simulação de monitoramento completo.

$HMT_{S(j)}$  = Altura manométrica total (m) retirada através da diferença entre o valor de altura manométrica na entrada da bomba e saída da bomba para a simulação sem uso de inversor de frequência.

Com os valores calculados de  $HMT_{T(j)}$  foi possível determinar as novas velocidades de rotação através da Equação 14. Foram realizadas as simulações com novas velocidade de rotação da unidade de bombeamento para cada posição angular da linha lateral, e com o dados da distribuição de pressão obtidos, foi gerada uma matriz (emissor i, posição angular j) ( $h_{T(i,j)}$ ). Para o caso do pivô 1, a matriz foi composta por 308 linhas (emissores) e 36 colunas (posições angulares da linha lateral). Para o caso do pivô 2, a matriz foi composta por 181 linhas (emissores) e 36 colunas (posições angulares da linha lateral).

### 3.7 Estratégia de Monitoramento com Posicionamento Otimizado (P)

Monitoramento com posicionamento otimizado na linha lateral móvel (P), abrange um único transdutor imaginário, com posição de instalação na lateral e valor de referência do sinal para controle da velocidade pelo inversor determinados com base na análise da distribuição especial obtida no monitoramento total (T).

Para a realização das simulações, foi necessário antes ter calculado os valores de  $h_{T(i,j)}$ . Através da matriz  $h_{T(i,j)}$  foi possível encontrar  $i_p$  que é a posição i que tinha o menor valor de coeficiente de variação da  $h_{T(i,j)}$ .

i) Cálculo da média

$$M_i = \frac{\sum_{j=1}^{36} h_{T(i,j)}}{36} \quad (14)$$

$M_i$  = média dos valores de carga de pressão para cada localização de emissor na linha lateral.

$h_{T(i,j)}$  = valor de carga de pressão de cada local de emissor em cada angulação da matriz da estratégia de monitoramento completo.

ii) Desvio padrão

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{36} (h_{T(i,j)} - M_i)^2}{36}} \quad (15)$$

$h_{T(i,j)}$  = valor de carga de pressão de cada local de emissor em cada angulação.

$M_i$  = média dos valores de carga de pressão para cada localização de emissor na linha lateral.

DP = Desvio padrão.

iii) Coeficiente de variação

$$CV_{T(i)} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{36} (h_{T(i,j)} - M_i)^2}{36}}}{M_i} \quad (16)$$

$CV_{T(i)}$  = coeficiente de variação de cada posição  $i$  da matriz  $h_{T(i,j)}$ .

Com a posição ( $i_p$ ) conhecida foi possível determinar o maior valor de carga de pressão ( $h_p$ ) observado na posição ( $i_p$ ) em todas as posições angulares ( $J$ ). O  $h_p$  foi o valor utilizado como o novo setting da válvula reguladora de pressão.

$$h_{p(J)} = \text{Maior} (h_{T(i_p,1)}, h_{T(i_p,2)}, h_{T(i_p,3)}, \dots, h_{T(i_p,36)}) \quad (17)$$

Após determinar o  $h_p$  foi possível calcular as novas velocidades de rotação ( $\alpha_{P(J)}$ ) para cada posição angular. Para isso, foi necessário realizar os cálculos das novas alturas manométricas totais ( $HMT_{P(J)}$ ) que posteriormente foram utilizadas no cálculo das novas velocidades de rotação.

$$EHMT_{P(J)} = h_{S(i_p, J)} - h_p \quad (18)$$

$$h_{S(i_p, J)} = \text{Mínimo} (h_{S(i_p, 1)}, \dots, h_{S(i_p, 36)}) \quad (19)$$

$EHMT_{P(J)}$  = Excesso de altura manométrica total da de cada posição angular (J), que será dissipado pela válvula reguladora de pressão na posição que tem a menor carga de pressão  $h_{S(i_p, J)}$  disponível em sua entrada sem a variação de rotação;

$h_{S(i_p, J)}$  = É o menor valor de carga de pressão disponível na entrada de uma VRP na posição angular (J), no ponto ideal.

$h_p$  = maior valor de carga de pressão observado na posição  $i_p$ .

$$HMT_{P(J)} = HMT_{S(J)} - EHMT_{P(J)} \quad (20)$$

$HMT_{P(J)}$  = Nova altura manométrica total (m) mais adequada para cada posição angular considerada para a simulação de monitoramento da localização otimizada.

$HMT_{S(J)}$  = Altura manométrica total (m) retirada através da diferença entre o valor de altura manométrica na entrada da bomba e saída da bomba para a simulação sem uso de inversor de frequência.

$EHMT_{P(J)}$  = Excesso de altura manométrica total da posição angular (J), que será dissipado pela válvula reguladora da posição que tem a menor carga de pressão ( $h_{S(i_p, J)}$ ) disponível em sua entrada para a estratégia sem variação de rotação.

Com os valores calculados de  $HMT_{P(J)}$ , foi possível calcular as novas velocidades de rotação através da raiz da Equação 21. As simulações foram realizadas e os dados geraram uma matriz  $h_{P(i, J)}$ .

Valores de velocidade de rotação para cada estratégia utilizada para os pivôs centrais 1 e 2, estão no Anexo.

### 3.8 Estratégia de Monitoramento otimizado das Extremidades (EO)

Monitoramento otimizado das extremidades da linha móvel (EO), abrange transdutores imaginários de pressão instalados nas extremidades da linha lateral, sendo que apenas o sinal correspondente ao menor dos dois valores lidos é enviado ao inversor, que mantém a velocidade de rotação da bomba de tal forma que o sinal elétrico recebido mantenha um valor igual ao sinal do transdutor quando a pressão lida atinge um valor de referência otimizado, que foi determinado com base na análise da distribuição especial obtida no monitoramento total (T).

A estratégia de monitoramento otimizado das extremidades consiste em encontrar um valor de setting que garante uma distribuição adequada da pressão em toda lateral, não faltando

pressão em nenhum dos emissores. Para essa estratégia foi necessário o uso da matriz gerada no monitoramento total  $h_{T(i,J)}$ . Através dessa matriz foram separados os dados de carga de pressão do primeiro e o último emissor para todas as posições angulares. Com esses dados foi determinado qual seria o menor valor de carga de pressão para cada posição entre os dois emissores comparados, ou seja, comparou na posição 1 se o emissor do início tinha menor carga de pressão que o emissor do final. Através desse novo valor de mínimo determinado entre os dois emissores foi necessário encontrar dentre todas as posições angulares o que tinha o maior valor de carga de pressão. Esse valor encontrado foi considerado novo setting da VRP para a estratégia de setting ideal.

Para a estratégia com otimização das extremidades, foi necessário calcular quais os  $(\alpha_{EO(J)})$  para cada posição angular. Para isso, foi necessário realizar os cálculos das novas alturas manométricas totais ( $HMT_{EO(J)}$ ) que posteriormente foram utilizadas no cálculo das novas velocidades de rotação. Através da matriz  $h_{E(i,J)}$  foram separados os dados de carga de pressão do primeiro e o último emissor para todas as posições angulares. Foi calculado o excesso de altura manométrica, e depois foi somado ao valor de altura manométrica determinado através da equação 10 e, posteriormente, se encontrou as novas velocidades de rotação.

$$EHMT_{EO(J)} = h_{\min ES(J)} - h_{VRP} \quad (21)$$

$$h_{\min EO(J)} = \text{Mínimo} (h_{S(1,J)}, h_{S(N_s,J)}) \quad (22)$$

$EHMT_{EI(J)}$  = Excesso de altura manométrica total da de cada posição angular (J), que será dissipado pela válvula reguladora de pressão na posição que tem a menor carga de pressão ( $h_{\min E(J)}$ ) disponível em sua entrada sem a variação de rotação;

$h_{\min EO(J)}$  = É o menor valor de carga de pressão disponível na entrada de uma VRP na posição angular (J) comparando a primeira saída com a última somente;

$h_{VRP}$  = Valor de setting da válvula reguladora VRP.

$N_s$  = Número de saídas do pivô central.

$$HMT_{EI(J)} = HMT_{S(J)} - EHMT_{EI(J)} \quad (23)$$

$HMT_{EO(J)}$  = Nova altura manométrica total (m) mais adequada para cada posição angular considerada para a simulação de monitoramento das extremidades.

$HMT_{S(J)}$  = Altura manométrica total (m) retirada através da diferença entre o valor de altura manométrica na entrada da bomba e saída da bomba para a simulação sem uso de inversor de frequência.

$EHMT_{EO(J)}$  = Excesso de altura manométrica total da posição angular (J), que será dissipado pela válvula reguladora da posição que tem a menor carga de pressão ( $h_{minEO(J)}$ ) disponível em sua entrada para a estratégia sem variação de rotação.

Com os valores calculados de  $HMT_{EO(J)}$  foi possível determinar as novas velocidades de rotação através da raiz da Equação 24. As simulações foram realizadas e os dados geraram uma matriz  $h_{EO(i,J)}$ .

### 3.9 Monitoramento das Extremidades (E)

Monitoramento das Extremidades (E) da linha móvel, que abrange transdutores imaginários de pressão instalados nas extremidades da linha lateral, sendo que apenas o sinal correspondente ao menor dos dois valores lidos é enviado ao inversor, que mantém a velocidade de rotação da bomba de tal forma que o sinal elétrico recebido mantenha um valor igual ao sinal do transdutor quando a pressão lida é a nominal das válvulas reguladoras de pressão.

Para a estratégia de monitoramento das extremidades foi necessário calcular quais as novas velocidades de rotação ( $\alpha_{E(J)}$ ) para cada posição angular. Para isso, foi necessário realizar os cálculos das novas alturas manométricas totais ( $HMT_{E(J)}$ ) que posteriormente foram utilizadas no cálculo das novas velocidades de rotação.

$$EHMT_{E(J)} = h_{minE(J)} - h_{VRP} \quad (24)$$

$$h_{minE(J)} = \text{Mínimo} (h_{S(1,J)}, h_{S(N_s,J)}) \quad (25)$$

$EHMT_{E(J)}$  = Excesso de altura manométrica total da de cada posição angular (J), que será dissipado pela válvula reguladora de pressão na posição que tem a menor carga de pressão ( $h_{minE(J)}$ ) disponível em sua entrada sem a variação de rotação;

$h_{minE(J)}$  = É o menor valor de carga de pressão disponível na entrada de uma VRP na posição angular (J) comparando a primeira saída com a última somente;

$h_{VRP}$  = Valor de setting da válvula reguladora VRP.

$N_s$  = Número de saídas do pivô central.

$$\text{HMT}_{E(J)} = \text{HMT}_{S(J)} - \text{EHMT}_{E(J)} \quad (26)$$

$\text{HMT}_{E(J)}$  = Nova altura manométrica total (m) mais adequada para cada posição angular considerada para a simulação de monitoramento das extremidades.

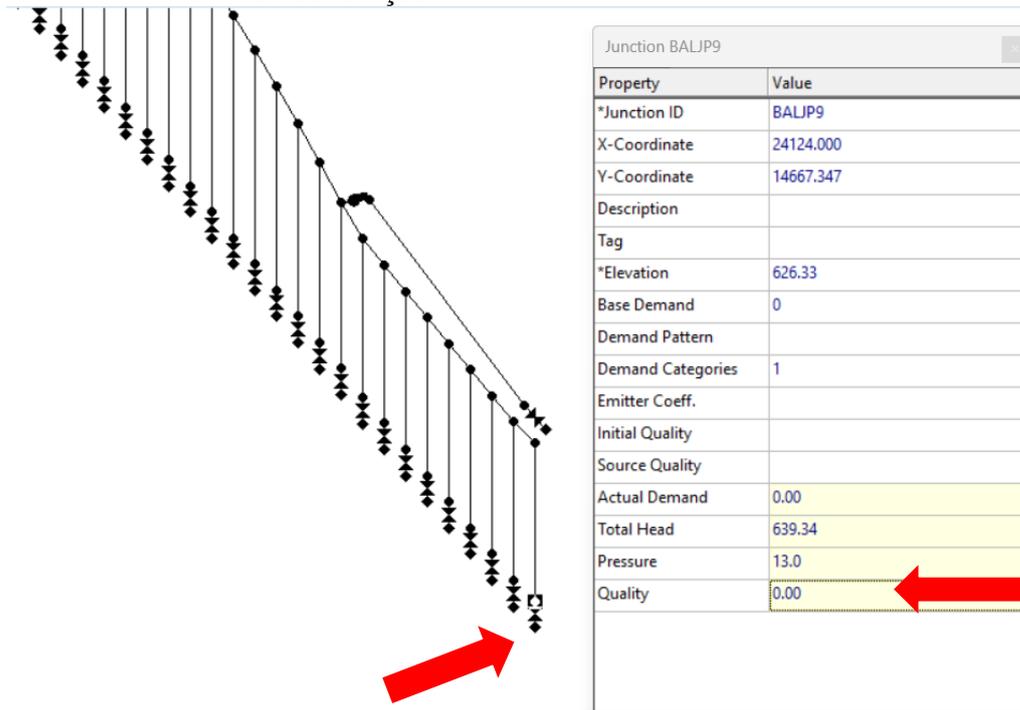
$\text{HMT}_{S(J)}$  = Altura manométrica total (m) retirada através da diferença entre o valor de altura manométrica na entrada da bomba e saída da bomba para a simulação sem uso de inversor de frequência.

$\text{EHMT}_{E(J)}$  = Excesso de altura manométrica total da posição angular (J), que será dissipado pela válvula reguladora da posição que tem a menor carga de pressão ( $h_{\min E(J)}$ ) disponível em sua entrada para a estratégia sem variação de rotação.

Com os valores calculados de  $\text{HMT}_{E(J)}$  foi possível determinar as novas velocidades de rotação através da raiz da Equação 27. As simulações foram realizadas e os dados geraram uma matriz  $h_{E(i,J)}$ .

A análise da distribuição da pressão nas angulações da linha lateral nas quais o valor de setting do monitoramento das extremidades resultou em distribuição inadequada da pressão (pressão mínima não coincidente com uma das extremidades e com valor abaixo da pressão nominal da válvulas), foi necessário mais um passo para essa estratégia: (i) determinar, em cada angulação, qual seria menor valor de pressão nas extremidades que faria com que a pressão mínima fosse mantida; (ii) encontrar o maior valor requerido em uma das extremidade (evidentemente acima da pressão nominal da válvula), que garante uma distribuição adequada da pressão em toda lateral e; (iii) determinou o valor adequado de setting para monitoramento nas extremidades (FIGURA 14). Com as velocidades de rotação encontradas para as posições angulares, foram refeitas as simulações e os dados gerados foram substituído na matriz  $h_{E(i,J)}$ , gerando uma matriz das extremidades com o valor de setting padrão adequado a todas as posições angulares.

Figura 14 - Conferindo se o valor de setting da VRP está correto quando modificada a velocidade de rotação.



Fonte: Do autor (2023).

### 3.10 Análise do consumo de energia elétrica

Para a análise do consumo de energia elétrica foi necessário utilizar as variáveis  $HMT_{w(J)}$ ,  $Q_{w(J)}$ ,  $CE_{w(J)}$ ,  $\eta_{m,w(J)}$ ,  $\eta_{b,w(J)}$ , em função de  $w$  que é a estratégia (P e EO) e a posição angular (J), seguindo a determinação adaptada da proposta por Baptista *et al.* (2019).

$$CE_{w(J)} = \frac{PEA_{w(J)}}{Q_{w(J)}} = \frac{1}{Q_{(J)}} \cdot \frac{Q_{(J)} \cdot \gamma \cdot HMT_{w(J)}}{\eta_{m,w(J)} \cdot \eta_{b,w(J)} \cdot \eta_i} \quad (27)$$

$CE_{w(J)}$  = Consumo específico de energia elétrica de acordo com a estratégia( $w$ ) e posição angular( $J$ ) ( $kWh \cdot m^{-3}$ );

$PEA_{w(J)}$  = Potência Elétrica Ativa de acordo com a estratégia e posição angular (kW);

$Q_{w(J)}$  = Vazão bombeada de acordo com a estratégia e posição angular ( $m^3 \cdot h^{-1}$ );

$\gamma$  - Peso específico da água ( $kN \cdot m^{-3}$ );

$HMT_{w(J)}$  = Altura manométrica total das posições angulares de acordo com a estratégia e posição angular;

$\eta_{m,w(J)}$  = Rendimento do motor ( $0 \leq \eta_{m,w(J)} \leq 1$ ) de acordo com a estratégia e posição angular;

$\eta_{b,w(J)}$  = Rendimento da bomba ( $0 \leq \eta_{b,w(J)} \leq 1$ ) de acordo com a estratégia e posição angular.

$\eta_i$  – Rendimento do inversor ( $0 \leq \eta_i \leq 1$ )

Para a análise sem o uso do inversor de frequência o valor de  $\eta_i$  é unitário. Para as demais estratégias o valor de  $\eta_i$  foi igual 0,94 para o rendimento do inversor. Esse valor seguiu o proposto por Brar (2015) e pode ser afirmado na publicação do Departamento de Energia dos Estados Unidos (2012).

Para a determinação do consumo específico de energia elétrica foi necessária a determinação dos rendimentos da bomba para cada estratégia e posição angular (J), seguindo a proposta por Briceño-León *et al.* (2021) com ajustes nos termos para ser uma equação de terceiro grau.

$$\eta_{b,w(J)} = d_e + c_e \cdot \frac{Q_{w(J)}}{\alpha_{(J)} \cdot N_n} + b_e \cdot \left( \frac{Q_{w(J)}}{\alpha_{(J)} \cdot N_n} \right)^2 + a_e \cdot \left( \frac{Q_{w(J)}}{\alpha_{(J)} \cdot N_n} \right)^3 \quad (28)$$

$\eta_{b,w(J)}$  = Rendimento da bomba ( $0 \leq \eta_{b,w(J)} \leq 1$ );

$d_e, a_e, b_e, c_e$  = coeficientes de ajuste da equação de rendimento da bomba;

$Q_{w(J)}$  = Vazão bombeada de acordo com a estratégia e posição angular ( $m^3h^{-1}$ );

$N_n$  = velocidade de rotação nominal (rpm);

$\alpha_{(J)}$  = é a velocidade de rotação determinada dividida pela velocidade de rotação nominal.

Tabela 4 – Valores dos parâmetros do rendimento da bomba determinados para o pivô central 1 e 2.

Rendimento da Bomba ( $\eta_b$ )			
Pivô 1		Pivô 2	
Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
$a_e$	23.097	$a_e$	-29.657
$b_e$	-28.382	$b_e$	40.457
$c_e$	8.3805	$c_e$	10.934
$d_e$	0.0685	$d_e$	0.1087

Fonte: Do autor (2023).

Para calcular o rendimento do motor foi necessário antes descobrir para cada posição angular de cada estratégia o valor do carregamento  $K$ .

$$K = \frac{P_{mec_{w(J)}}}{Pot_N} \quad (29)$$

$P_{mec_{n(J)}}$  = Potência mecânica no eixo da bomba (kW).

$P_N$  = Potência Nominal (kW).

$$P_{mec_{w(J)}} = \frac{\gamma \cdot \frac{Q_{w(J)}}{3600} \cdot HMT_{w(J)}}{\eta_{b,w(J)}} \quad (30)$$

$K$  = Carregamento.

$HMT_{w(J)}$  = Altura manométrica total para cada estratégia e posição angular em (m);

$Q_{w(J)}$  = Vazão bombeada de acordo com a estratégia e posição angular ( $m^3h^{-1}$ );

$\gamma$  = Peso específico da água em ( $kNm^{-3}$ );

$\eta_{b,w(J)}$  = Rendimento da bomba ( $0 \leq \eta_{b,w(J)} \leq 1$ );

$P_{mec_{w(J)}}$  = Potência mecânica no eixo da bomba (kW) para cada estratégia e posição angular.

Para a determinação do rendimento do motor para todas as estratégias e posições angulares foi necessário ajustar a equação do rendimento, conforme realizado por Bernier e Bourret (1999) e Ma e Wang (2009). Foram usados os valores de  $K_c$  e rendimento do motor disponíveis no catálogo do fabricante. Foi feito o ajuste da curva para os parâmetros  $F_m$  e  $G_m$ . Foi determinado o valor de rendimento para cada estratégia em cada posição angular.

$$\eta_{m,w(J)} = F_m \cdot (1 - e^{-G_m K}) \quad (31)$$

$\eta_{m,w(J)}$  = Rendimento do motor ( $0 \leq \eta_{m,w(J)} \leq 1$ );

$F_m, G_m$  = coeficientes de ajuste da equação de rendimento do motor;

$K$  = Carregamento.

Tabela 5 – Valores dos parâmetros do rendimento do motor determinados para o pivô central 1 e 2.

Rendimento do Motor ( $\eta_m$ )			
Pivô 1		Pivô 2	
Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
$F_m$	0.94367	$F_m$	0.9333
$G_m$	-7.50808	$G_m$	-6.61277

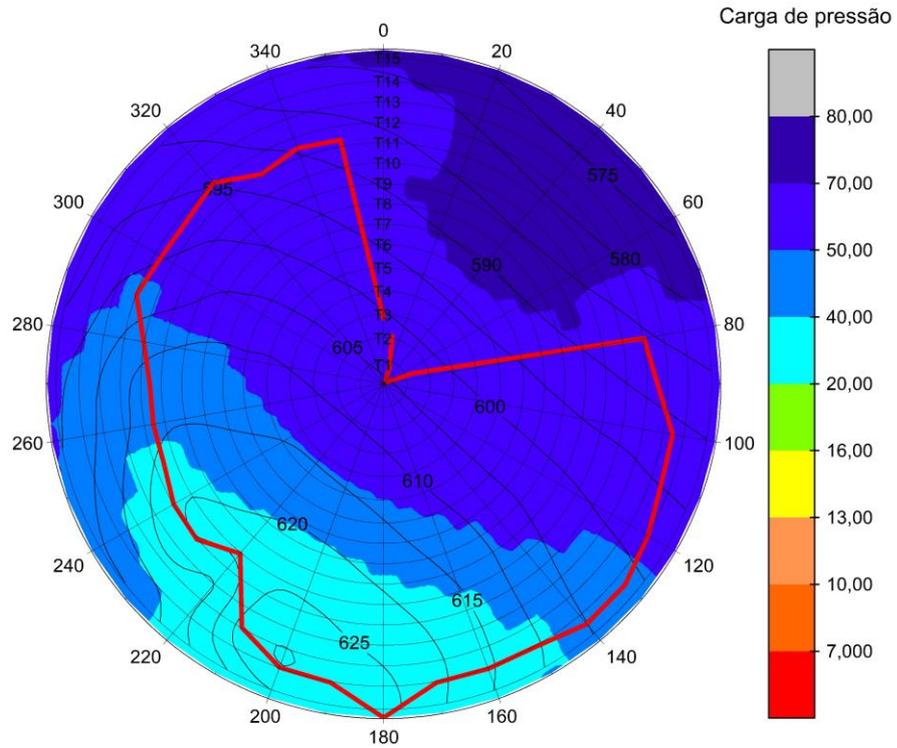
Fonte: Do autor (2023).

#### **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os impactos da topografia na operação do pivô central podem ser feitos avaliando a distribuição espacial da carga de pressão na linha lateral móvel dos pivôs centrais, através da diferença de carga de pressão máxima e mínima requerida no ponto do pivô central para sua operação como Brar (2015) propôs. O autor ainda afirma que em topografias planas ou com baixas elevações os pivôs centrais apresentaram menor gasto energético para suas operações, mais que diferentes elevações topográficas desempenham um papel vital em governar a pressão necessária em toda a linha lateral móvel.

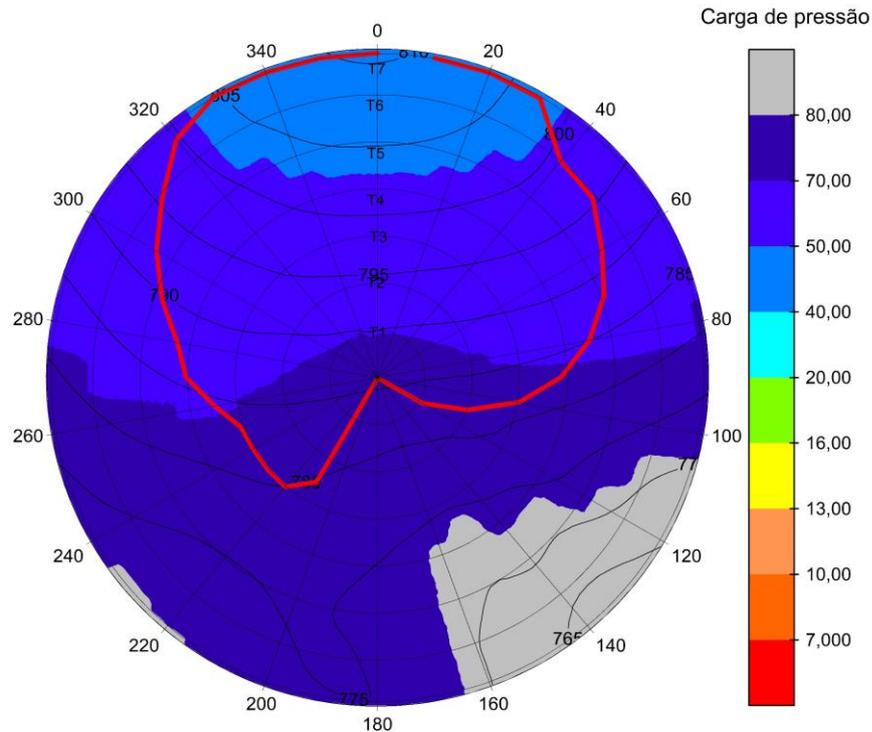
A distribuição da carga de pressão para os pivôs centrais 1 e 2 operando sem o uso e inversor de frequência seguem nas Figuras 15 e 16. Para o pivô central 1 que tinha o uso de canhão final, nas figuras relacionadas as suas estratégias, a distribuição de carga de pressão nas figuras não inclui a área do canhão final, somente a linha lateral móvel até o último emissor.

Figura 15 – Distribuição espacial de carga de pressão ao longo da linha lateral, com a marcação do ponto de mínima carga de pressão para cada angulação ( $\theta$ ) com o pivô central 1 operando sem o uso do inversor de frequência (S).



Fonte: Do autor (2023).

Figura 16 – Distribuição espacial de carga de pressão ao longo da linha lateral, com a marcação do ponto de mínima carga de pressão para cada angulação ( $\theta$ ) com o pivô central 2 operando sem o uso do inversor de frequência (S).

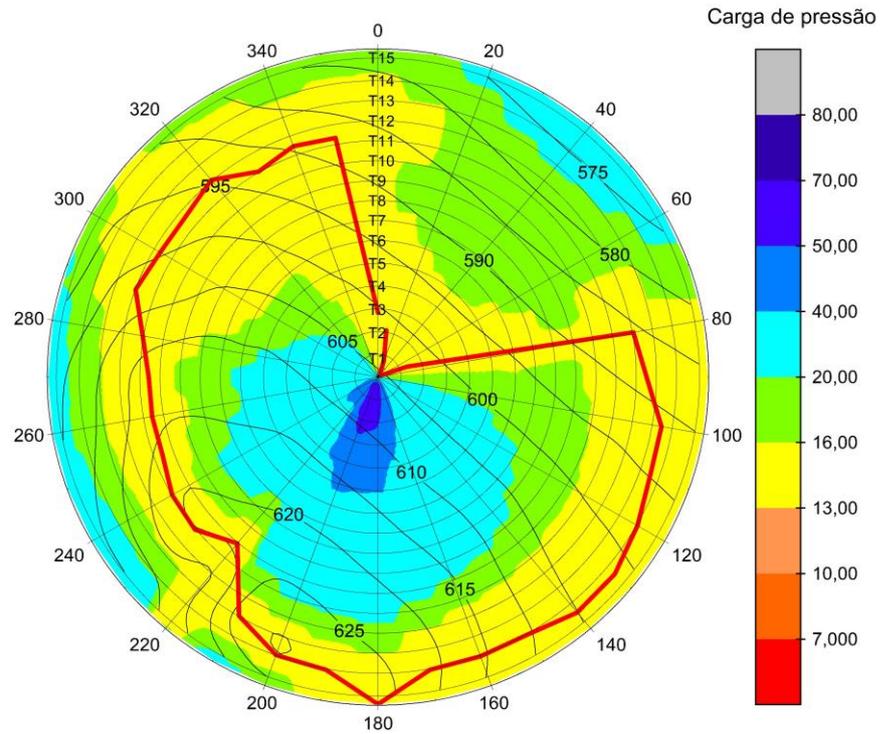


Fonte: Do autor (2023).

Valores de carga de pressão sem o uso de inversor de frequência apresentam valores bem acima dos de referência das VRPs mostrando que para esse método sem uso de inversor pode prejudicar a qualidade da irrigação. Foi observado também que o ponto de mínima carga de pressão se deslocou por toda a linha lateral móvel do pivô central de acordo com a angulação que ele operava, como vai ser representado nas estratégias e monitoramentos. O ponto de mínima carga de pressão não necessariamente estava situado no começo ou final da linha lateral como é esperado nesse tipo de estratégia, assim como foi confirmado por King e Wall (2000), que estudou a distribuição espacial da pressão em uma linha lateral móvel de pivô central e constatou que o ponto de menor carga de pressão não está exclusivamente situado no fim da lateral móvel e que o correto seria a instalação do sensor de controle nas torres 6 e 10 do pivô central.

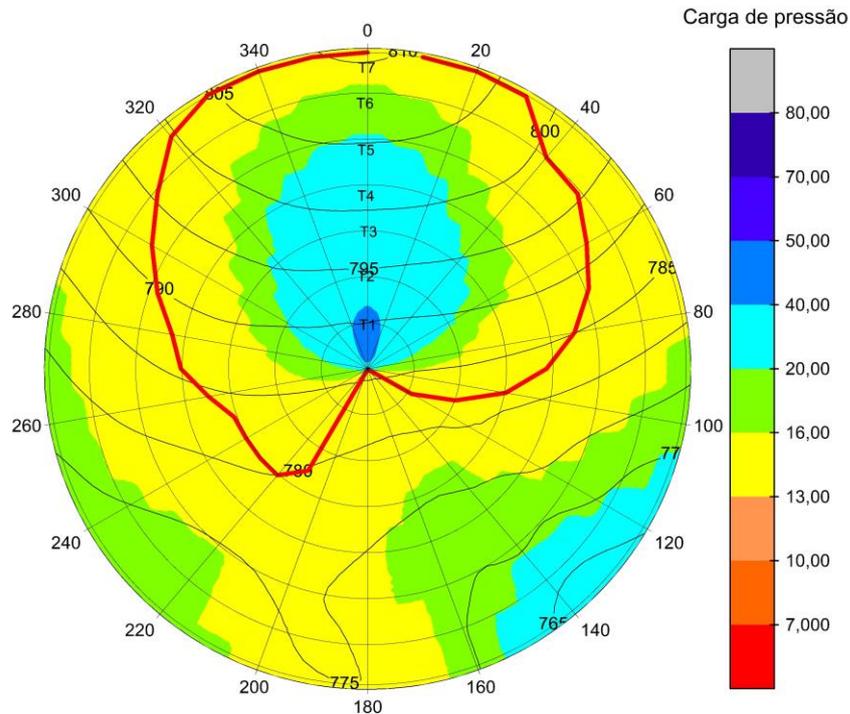
A distribuição da carga de pressão para os pivôs centrais 1 e 2 operando no monitoramento total seguem nas Figuras 17 e 18.

Figura 17 – Distribuição espacial de carga de pressão ao longo da linha lateral, com a marcação do ponto de mínima carga de pressão para cada angulação ( $\theta$ ) com o pivô central 1 operando no Monitoramento Total (T).



Fonte: Do autor (2023).

Figura 18 – Distribuição espacial de carga de pressão ao longo da linha lateral, com a marcação do ponto de mínima carga de pressão para cada angulação ( $\theta$ ) com o pivô central 2 operando no Monitoramento Total (T).

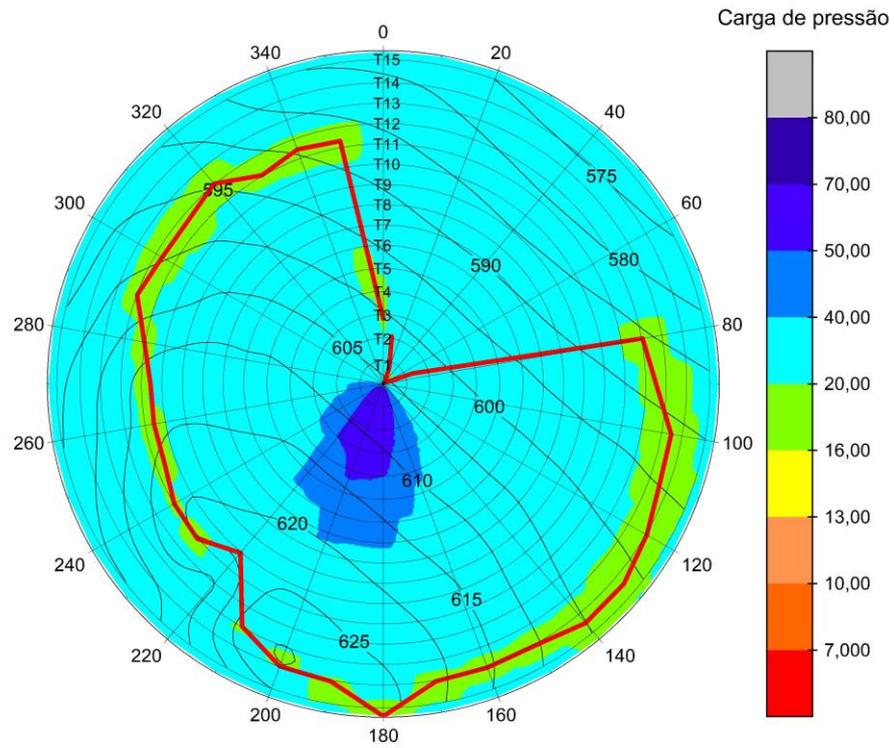


Fonte: Do autor (2023).

Para o monitoramento total (T) que é a estratégia na qual ocorre monitoramento da carga de pressão de todos os emissores da linha lateral móvel do pivô central, gerando um controle ideal em todos os emissores pode perceber que o valor referência de carga de pressão com valor igual ao da carga nominal das válvulas reguladora de pressão para o pivô central 1 (13m) e pivô central 2 (13m). Através distribuição da carga de pressão pode afirmar que a qualidade de irrigação não foi afetada. Durante a operação em todas as posições angulares (J) o menor valor de carga de pressão foi sempre maior ou igual ao valor da carga nominal das válvulas reguladora de pressão.

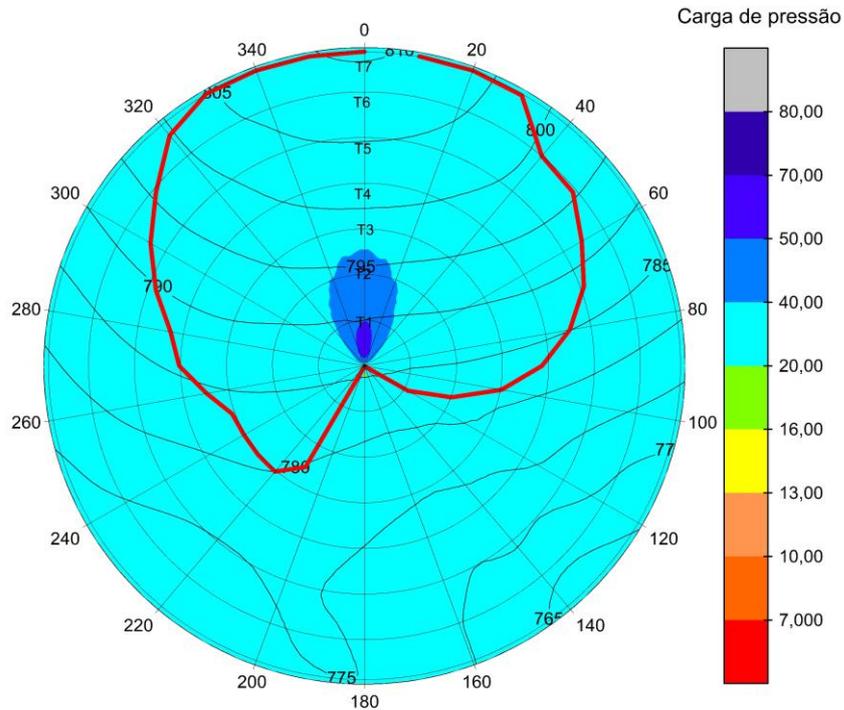
A distribuição da carga de pressão para os pivôs centrais 1 e 2 operando na Estratégia com Posicionamento Otimizado (P) seguem nas Figuras 19 e 20.

Figura 19 - Distribuição espacial de carga de pressão ao longo da linha lateral, com a marcação do ponto de mínima carga de pressão para cada angulação ( $\theta$ ) com o pivô central 1 operando na Estratégia de Monitoramento com Posicionamento Otimizado (P).



Fonte: Do autor (2023).

Figura 20 – Distribuição espacial de carga de pressão ao longo da linha lateral, com a marcação do ponto de mínima carga de pressão para cada angulação ( $\theta$ ) com o pivô central 2 operando na Estratégia de Monitoramento com Posicionamento Otimizado (P).



Fonte: Do autor (2023).

Para a Estratégia de Monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) que é a estratégia na qual se determina tanto a posição de instalação do único sensor de monitoramento na lateral, assim como o valor de referência da carga de pressão utilizada no controle da rotação da unidade de bombeamento. Valor de referência de carga de pressão pivô central 1 foi de (19.62m) e para o pivô central 2 (20.23m). Através distribuição da carga de pressão pode afirmar que a qualidade de irrigação não foi afetada. Durante a operação em todas as posições angulares (J) o menor valor de carga de pressão foi sempre maior ou igual ao valor de referência utilizado.

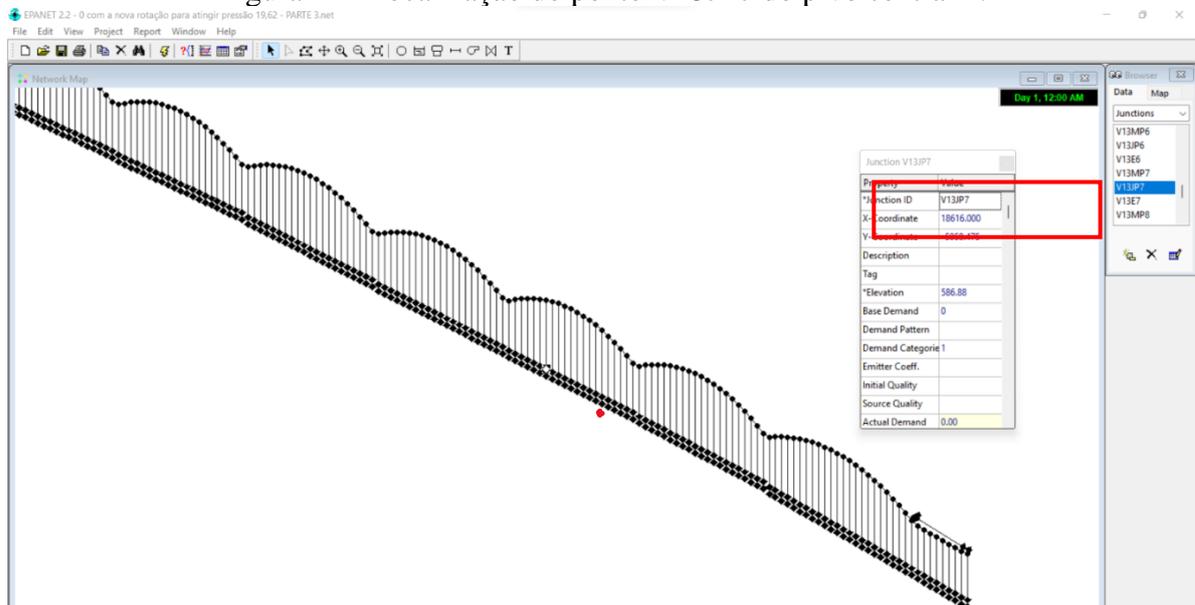
Através das Figuras 21 e 22 são identificados os pontos que possuem o menor coeficiente de variação dentre todas as posições angulares para o pivô central Vila Propício e Formiga. Para o pivô central Vila Propício a localização ideal foi identificada no vão 13 do pivô central na jusante do emissor 7 desse vão que é identificado no software EPANET 2.2 como o V13JP7. E para o pivô central Formiga a localização ideal foi identificada no vão 6 do pivô

central na jusante do emissor 7 desse vão que é identificado no software EPANET 2.2 como V6JP7.

De acordo com as análises realizadas, a instalação do transdutor de pressão operando com o inversor de frequência, pode ser feita através da determinação dessa posição ótima para cada pivô central. Brar *et al.* (2017) aconselham a não instalar o transdutor de pressão na última torre como é sugerido por alguns fabricantes, devido que o menor valor de carga de pressão na linha lateral do pivô central nem sempre vai estar na primeira ou última torre e sim migrando por toda a lateral móvel do pivô central. Dessa forma, a instalação incorreta do transdutor em um ponto que não vai fazer as leituras de valores de carga de pressão menores acarreta o envio do sinal pro inversor de frequência incorreto, fazendo com que haja a alteração da velocidade de rotação da bomba associada a esse valor que não é o ideal, gerando maiores gastos com a energia consumida e má distribuição espacial da carga de pressão.

Na Figura 21 é identificado o ponto que possui o menor coeficiente de variação dentre todas as posições angulares determinado na estratégia de Monitoramento com Posicionamento Otimizado(P). O ponto determinado é o V13JP7 para o pivô central 1.

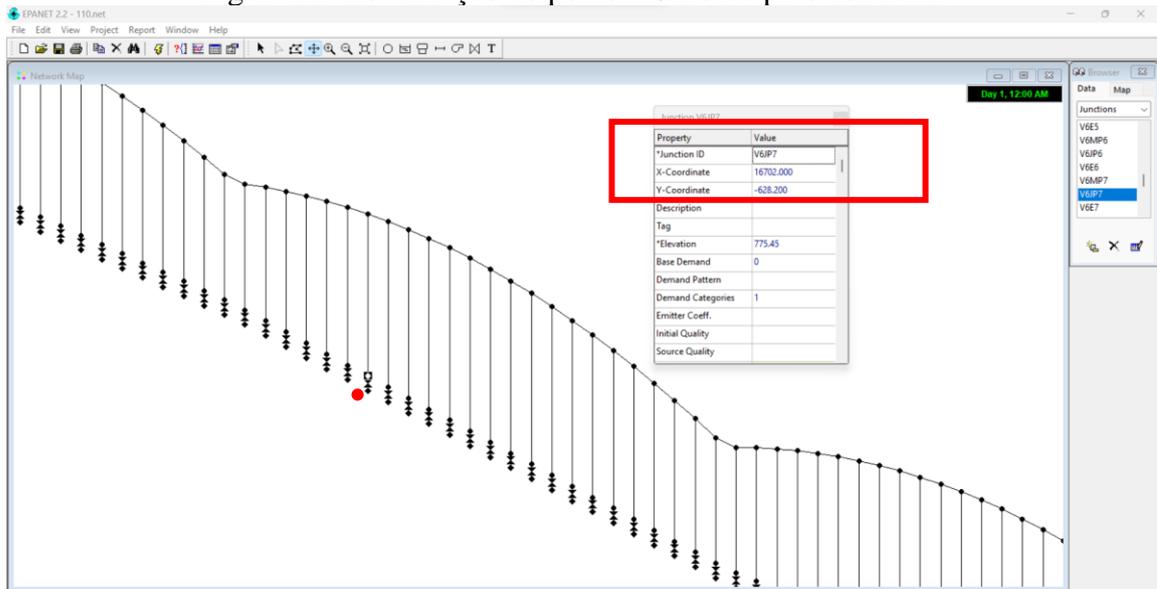
Figura 21 –Localização do ponto V13JP7 do pivô central 1.



Fonte: Do autor (2023).

Na Figura 22 é apresentado o ponto com o menor coeficiente de variação dentre todas as posições angulares determinado na estratégia de Monitoramento com Posicionamento Otimizado(P) para o pivô central 2. O ponto determinado é o V6JP7.

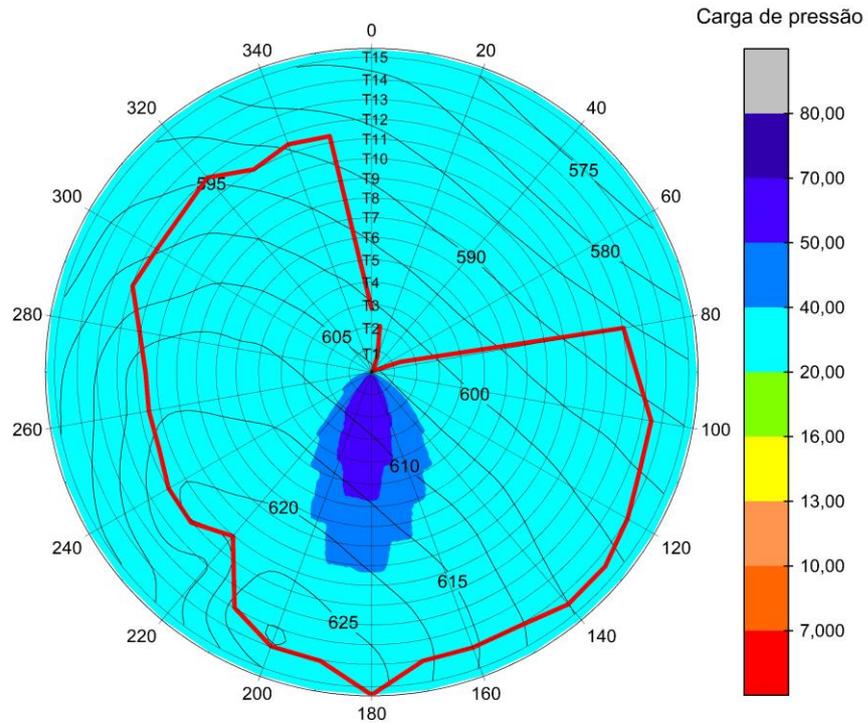
Figura 22- Localização do ponto V6JP7 do pivô central 2.



Fonte: Do autor (2023).

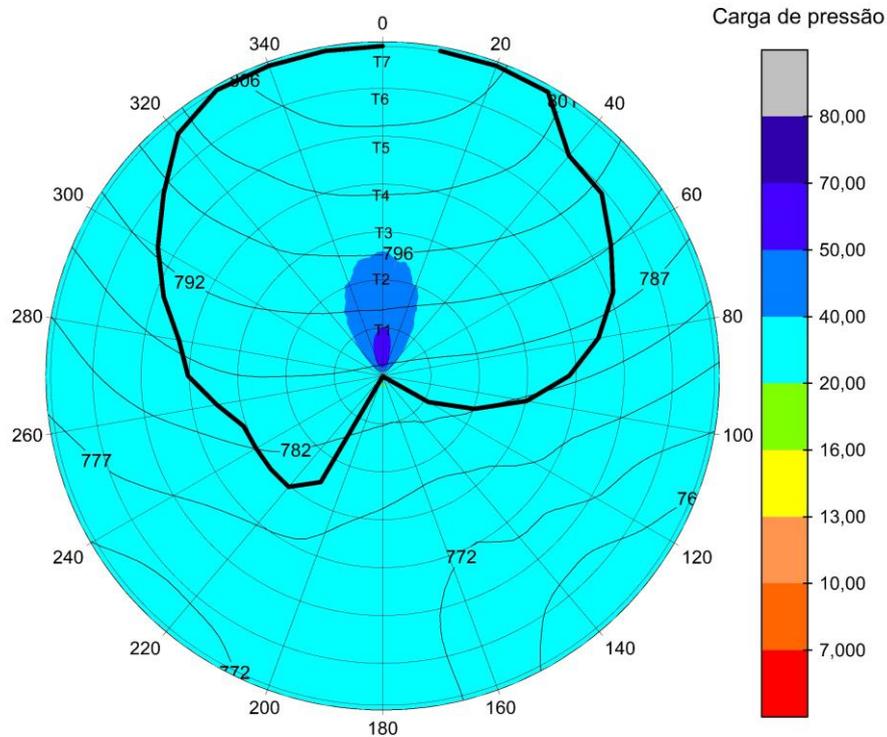
A distribuição da carga de pressão para os pivôs centrais 1 e 2 operando na Estratégia do Monitoramento Otimizado das Extremidades (EO) seguem nas Figuras 23 e 24.

Figura 23 – Distribuição espacial de carga de pressão ao longo da linha lateral, com a marcação do ponto de mínima carga de pressão para cada angulação ( $\theta$ ) com o pivô central 1 operando com a estratégia de Monitoramento Otimizado das Extremidades (EO).



Fonte: Do autor (2023).

Figura 24 – Distribuição espacial de carga de pressão ao longo da linha lateral, com a marcação do ponto de mínima carga de pressão para cada angulação ( $\theta$ ) com o pivô central 2 operando com a estratégia de Monitoramento Otimizado das Extremidades (EO).



Fonte: Do autor (2023).

Para a Estratégia de Monitoramento Otimizado das Extremidades (EO) que é o monitoramento das cargas de pressão nas duas extremidades lateral móvel do pivô central, sendo que, em cada posição angular  $J$ , apenas o menor valor monitorado de carga de pressão é comparado ao valor de referência para controle da rotação da unidade de bombeamento. O valor de referência da carga de pressão utilizada no controle da rotação da unidade de bombeamento do pivô central 1 foi de (25.33 m) e para o pivô central 2 de (20.45 m). Através distribuição da carga de pressão qualidade de irrigação pode afirmar que a não foi afetada. Durante a operação em todas as posições angulares ( $J$ ) o menor valor de carga de pressão foi sempre maior ou igual ao valor de referência utilizado.

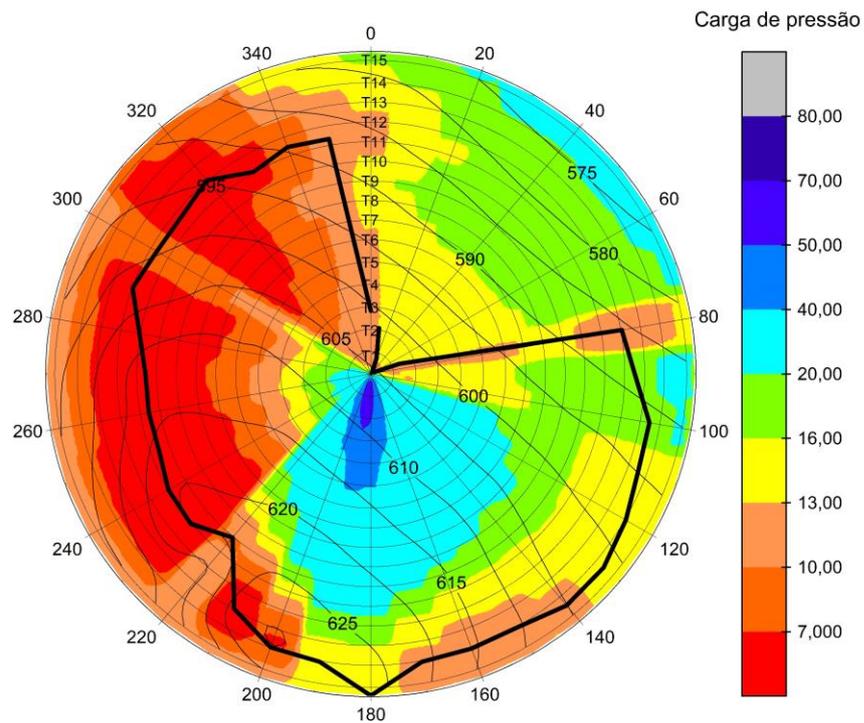
Para esta estratégia com uso de dois transdutores nas extremidades o seu uso só pode ser feito, se o valor de referência encontrado mantém a qualidade da irrigação.

Os fabricantes de equipamentos de irrigação propõem que seja instalado o transdutor de pressão para fornecer informações de pressão da tubulação para o inversor de frequência na

primeira torre (primeiro emissor do pivô central), na ponta do pivô central (último emissor do pivô central) ou a instalação em ambos os lugares para a sua operação conjunta.

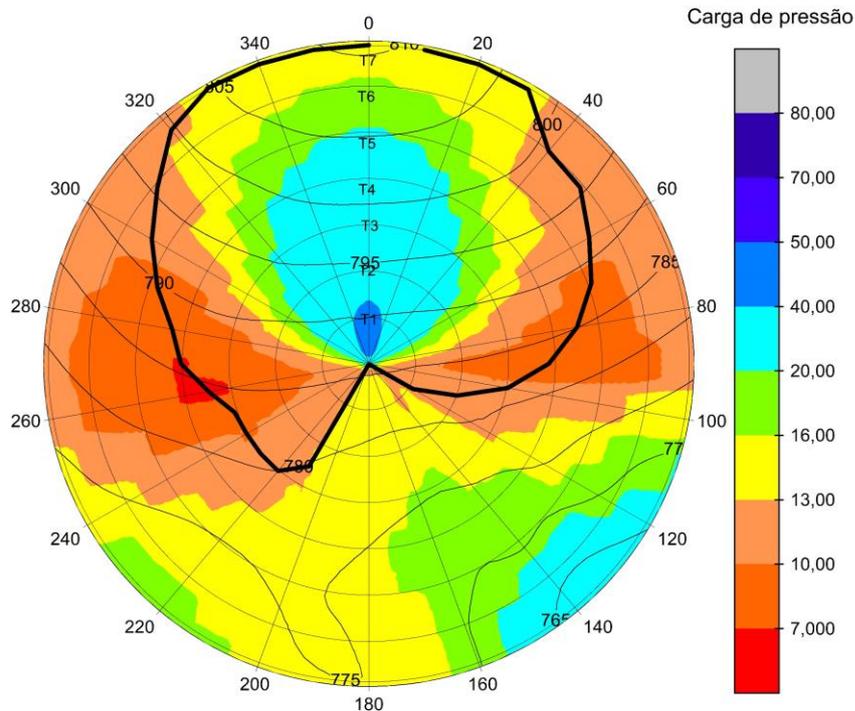
A distribuição da carga de pressão para os pivôs centrais 1 e 2 operando na np Monitoramento das Extremidades (E) seguem nas Figuras 25 e 26

Figura 25 – Distribuição espacial de carga de pressão ao longo da linha lateral, com a marcação do ponto de mínima carga de pressão para cada angulação ( $\theta$ ) com o pivô central 1 operando Monitoramento das Extremidades(E).



Fonte: Do autor (2023).

Figura 26 – Distribuição espacial de carga de pressão ao longo da linha lateral, com a marcação do ponto de mínima carga de pressão para cada angulação ( $\theta$ ) com o pivô central 2 operando Monitoramento das Extremidades(E).



Fonte: Do autor (2023).

No monitoramento das extremidades (E) em que há a instalação desses transdutores nas extremidades, foi observada uma distribuição da carga de pressão que afeta a qualidade de irrigação, por apresentar valores da carga de pressão abaixo dos valores de carga nominal (13 m) das válvulas reguladora de pressão. A distribuição da carga de pressão fica comprometida, gerando uma falta de pressão em alguns emissores da linha lateral móvel comprometendo a qualidade da irrigação.

Os fabricantes de equipamentos de irrigação propõem que seja instalado o transdutor de pressão para fornecer informações de pressão da tubulação para o inversor de frequência na primeira torre (primeiro emissor do pivô central), na ponta do pivô central (último emissor do pivô central) ou a instalação em ambos os lugares para a sua operação conjunta. No monitoramento das extremidades (E) em que há a instalação desses transdutores nas extremidades, foi observada uma distribuição da carga de pressão inadequada para ambos os pivôs centrais afetando a qualidade da irrigação.

Além da distribuição espacial da carga de pressão inadequada, para as estratégias em que a distribuição espacial da carga de pressão é adequada vemos que o ponto de mínima pressão não fica migrando em diversos valores de carga de pressão, e sim que é encontrado na posição adequada onde tem como menor valor o de referência aplicado nas estratégias bem como vemos que há uma uniformidade de aplicação por toda a área.

Os valores de consumo específico de energia elétrica para as estratégias de Estratégia Monitoramento Otimizado das Extremidades (EO), Estratégia do Monitoramento do Posicionamento Otimizado (P), para o monitoramento Total apresentadas nas Tabelas 7,8,9,10,11,12 localizadas no Anexo A. Como este pivô opera com um giro de 360°, o valor médio do CE foi computado considerando trinta e seis ( $j = 1, 2, \dots, 36$ ) posições angulares igualmente espaçadas de 10° ( $0^\circ < \theta \leq 360^\circ$ ) e assumidas pela linha lateral durante o seu giro na área irrigada.

É mostrado na Tabela 6 um resumo do valor médio de consumo específico de energia elétrica (CE) encontrado nas análises de consumo específico de energia disponíveis nas tabelas 7,8,9,10,11,12 que estão no Anexo A.

Tabela 6 – Dados do pivô central Formiga operando sem variação da rotação.

<b>Estratégia</b>	<b>Consumo Específico Médio de Energia (kWh m<sup>-3</sup>)</b>
<b>Pivô central 1</b>	
Sem o uso do inversor de frequência(S)	0.4634
Monitoramento total (T)	0.3566
Posicionamento Otimizado (P)	0.3666
Monitoramento Otimizado das Extremidade (EO)	0.3842
*Monitoramento das Extremidades(E)	0.3283
<b>Pivô central 2</b>	
Sem o uso do inversor de frequência(S)	0.5260
Monitoramento total (T)	0.3292
Posicionamento Otimizado (P)	0.3455
Monitoramento Otimizado das Extremidade (EO)	0.3476
*Monitoramento das Extremidades(E)	0.3268

\*Monitoramento das extremidades em que há perda da qualidade de irrigação e não foi usado na comparação entre as estratégias no consumo específico.

Fonte: Do autor (2023).

Ao comparar as análises feitas com os pivôs centrais operando com o uso do inversor de frequência com os pivôs centrais operando sem o uso do inversor, a redução média no consumo específico de energia elétrica foi de 23.04%, ou 0.1068 kWh m<sup>-3</sup> para o pivô central 1 e 37.41% ou 0.1968 kWh m<sup>-3</sup> para o pivô central 2 no Monitoramento Total (T), uma redução média de 20.88% ou 0.0968 kWh m<sup>-3</sup> para o pivô central 1 e 34.31% ou 0.1805 kWh m<sup>-3</sup> para o pivô central 2 na estratégia de Monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) e 17.09% ou 0.0792 kWh m<sup>-3</sup> para o pivô central 1 e 33.91% ou 0.1784 kWh m<sup>-3</sup> para o pivô central 2 na estratégia de Monitoramento Otimizado das Extremidades (EO). Os valores determinados foram superiores aos valores encontrados por Baptista et al., (2019) 12.2% e Brar *et al.* (2017) 9.6% em suas análises considerando estratégia de controle ideal (monitoramento total)

O monitoramento nas extremidades (E) está associado com a maior redução no valor de consumo específico médio porque, nas angulações nas quais o ponto de mínima pressão não coincide com uma das extremidades da linha lateral, o valor da pressão de referência escolhido para controle da velocidade de rotação da unidade de bombeamento impõe valores de velocidade de rotação da unidade de bombeamento que são menores que a velocidade de rotação recomendada para estas posições angulares. A distribuição da carga de pressão fica comprometida, gerando uma falta de pressão em alguns emissores da linha lateral móvel.

Dessa forma, deve-se comparar somente o consumo médio de energia elétrica do pivô central das estratégias em que há distribuição adequada da pressão por toda linha lateral móvel.

Sendo assim, ao comparar o valor médio encontrado do consumo específico de energia elétrica da estratégia de Monitoramento Otimizado das Extremidade (EO) com estratégia de Monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) (distribuição adequada da pressão) o valor médio de consumo específico de energia no Monitoramento Otimizado das Extremidade (EO) foi de 0.3842 kWh m<sup>-3</sup> e de 0.3666 kWh m<sup>-3</sup> do Monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) para o pivô central 1 e Monitoramento Otimizado das Extremidade (EO) de 0.3476 kWh m<sup>-3</sup> e 0.3455 kWh m<sup>-3</sup> Monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) para o pivô central 2. Com isso, a estratégia com a posicionamento otimizado (P) apresenta uma economia média de consumo de energia de 4.58% para o pivô central Vila Propício e 0.60% para o pivô central Formiga, demonstrando ser uma estratégia mais eficiente quanto a questão do consumo de energia.

Com os resultados apresentados pode-se concluir que operar através da estratégia de monitoramento pela extremidade (E) não é satisfatória, pois pode promover até um menor consumo específico de energia elétrica, porém essa estratégia gera uma má distribuição espacial da carga de pressão que afeta a uniformidade de aplicação dos pivôs centrais, seu uso só será

ideal desde que seja determinado um valor de referência como feito na estratégia de Monitoramento Otimizado das Extremidades (EO).

A estratégia com o Monitoramento Total (T) consegue ser a mais ideal dentre as estratégias em que temos uma distribuição adequada de pressão por toda linha lateral móvel, porém a implementação dessa estratégia em campo é inviável, sendo somente uma análise adequada para simulações.

A estratégia com Monitoramento do Posicionamento Otimizado(P) surge como uma alternativa mais viável e adequada, pois foi observado que através dessa estratégia a distribuição da carga de pressão bem como o consumo específico de energia ficam adequados a operação dos pivôs centrais sendo uma ótima opção a Estratégia Otimizada das Extremidades (EO).

Um ponto que deve ser enfatizado foi que o uso do inversor de frequência proporcionou bons benefícios monetários quando associado as estratégias do controle de velocidade de rotação da bomba.

## 5 CONCLUSÃO

Concluiu-se que é possível simular a distribuição espacial da carga de pressão na linha lateral para os dois pivôs centrais avaliados e que a variação topográfica e a estratégia utilizada, desempenham um papel vital em governar a distribuição espacial da carga de pressão por toda a linha lateral móvel dos pivôs centrais.

Além de que, as estratégias para o manejo do consumo de energia aplicadas com o controle da velocidade de rotação da unidade de bombeamento, permitiram reduzir o consumo de energia com relação ao uso da rotação fixa, porém, deve-se ter atenção à estratégia utilizada para não prejudicar a qualidade da irrigação.

A estratégia de Monitoramento Otimizado das Extremidades (EO) pode ser aplicada desde que obedeça ao valor determinado para que não ocorra falta de pressão na linha lateral móvel.

Monitoramento das extremidades (E) demonstrou que a qualidade da irrigação fica prejudicada, pois falta pressão em alguns pontos da linha lateral móvel e não é indicada.

Portanto, a estratégia de Monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) se mostrou a mais adequada e indicada, por sua distribuição da carga de pressão não afetar a qualidade de irrigação, bem como promoveu uma melhor redução do consumo específico de energia quando comparado à Estratégia de Monitoramento Otimizado da Extremidades (EO). Assim, se torna uma estratégia viável para implantação e a mais indicada.

A instalação do transdutor de pressão na posição ideal V13JP7 para o pivô central 1 e V6JP7 para o pivô central 2, demonstrou melhores benefícios para a operação dos pivôs centrais nos requisitos de pressão de operação, pois a distribuição da carga de pressão se mantém adequada, não prejudicando a irrigação.

Este estudo da distribuição espacial da carga da pressão em toda a área irrigada pelos pivôs centrais, e a análise do consumo de energia das estratégias, permitiu fornecer uma alternativa para a operação dos pivôs centrais com uso de inversores de frequência. Além disso, fornece aos produtores, pesquisadores e fabricantes, os benefícios da adoção de inversores de frequência, o uso da variação da velocidade de rotação, e a análise da distribuição de carga de pressão em pivôs centrais.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, I. A. *et al.* Energy consumption reduction of a center-pivot with the use of a variable-frequency drive. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, [S.l.], v. 16, 2021.
- ANDRADE, C. de L. T. de, ALLEN, R.G. Pump curve combination model. *In*: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE INFORMÁTICA NA AGROPECUÁRIA, 1., 1997, Lavras. **Anais [...]**. Lavras: UFLA, 1997. p. 329-341.
- ARAÚJO, J.A. B. de. **Aplicação de inversor de frequência para economia de energia elétrica, em sistema de irrigação por aspersão**. 2003. 142 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, SP, 2003.
- AZEVEDO, E. B. **Viabilidade do uso de inversores de frequência em sistemas de irrigação do tipo pivô central**. 2023. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003;
- BAPTISTA, V. B. da S. *et al.* Feasibility of the use of variable speed drives in center pivot systems installed in plots with variable topography. **Water**, [S.l.], v. 11, n. 10, p. 2192, 2019.
- 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**, [S.l.], v. 38, n. 2, p. 284-292, 2018.
- BERNIER, M. A.; BOURRET, B. Pumping energy and variable frequency drives. **ASHRAE Journal**, [S.l.], v. 41, n. 12, p. 37, 1999.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5. ed. Viçosa: UFV, 1989. 596 p.
- 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**, [S.l.], v. 127, p.61-69, 2014.
- BRAR, D. **Conservation of energy using variable frequency drive for center pivot irrigation systems in Nebraska**. 2015. 156 p. Thesis (Master's University of Nebraska) – Nebraska, Lincoln, 2015.
- BRAR, D.; KRANZ, W.L.; LO, T.; IRMAK, S.; MARTIN, D.L. Energy Conservation Using Variable-Frequency Drives for Center-Pivot Irrigation: Standard Systems. *Trans.* **ASABE**, [S.l.], v. 60, p. 95-106, 2017.
- BRICEÑO-LEÓN, C. X.; IGLESIAS-REY, P. L.; MARTINEZ-SOLANO, F. J.; MORAMELIA, D.; FUERTES-MIQUEL, V. S. Use of fixed and variable speed pumps in water distribution networks with different control strategies. **Water**, [S.l.], v. 13, n. 4, p. 479, 2021.
- CAMPANA, S. **Racionalização do uso de energia elétrica em sistemas de irrigação tipos pivô centrais e aspersão convencional**. 2000. 108 p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2000.

CARLSON, R. The correct method of calculating energy savings to justify adjustable-frequency drives on pumps. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [S.l.], v. 36, n. 6, p. 1725-1733, 2000.

CARVALHO, D. F. **Instalações elevatórias: bombas**. 6. ed. Belo Horizonte: UFMG/FUMARC, 1999. 353 p.

COUTINHO, R.S.; SOARES, A. K. Simulação de bombas com velocidade de rotação variável no EPANET. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.l.], v. 22, p. 797-808, 2017.

DA SILVA, F.G.B.; VALADÃO, M.N.; BARROS, R.M. Simulação hidráulica de redes de abastecimento de água com o uso do EPANET 2.0—aplicação em setores de Itajubá—MG. *In*: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORTE E CENTRO OESTE, 2007, 1., [S.l.]. **Anais [...]**, [S.l.], 2007.

DANFOSS. **Sensorless pump control for VLT600 HVAC / FCM 300**. Documento MG.10. T1.02. 2006.

DOE. Departamento de Energia dos Estados Unidos. **Adjustable Speed Drive Part-Load Efficiency, Motor Systems. Tip Sheet #11**. United States: N. p. November, 2012. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56002.pdf>. Acesso em: 06 fev. 2023.

FRANCHI, C. M. **Inversores de Frequência: Teoria e Aplicações**. São Paulo: Érica, 2008.

FRIZZONE, J.A. *et al.* **Irrigação por aspersão: sistema pivô central**. 1. ed. Maringá: UEM, 2018.

GARCIAIBARRA, A. R. *et al.* Transmissor de pressão diferencial de altíssima precisão e confiabilidade. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL E EXPOSIÇÃO SUL-AMERICANA DE AUTOMAÇÃO, SISTEMAS E INSTRUMENTAÇÃO. 2013, 17., [S.l.]. **Anais [...]**, [S.l.], 2013.

GOMES, H. P. **Sistemas de Irrigação: Eficiência Energética**. João Pessoa: UFPB, 2013.

HANSON, B.R.; WEIGAND, C.; ORLOFF, S. Variable-frequency drives for electric irrigation pumping plants save energy. **Calif. Agric.**, [S.l.], v. 50, p. 36-39, 1996.

HANSON, B., WEIGAND, C., ORLOFF, S. Performance of electric irrigation pumping plants using variable frequency drives. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [S.l.], v. 122, n. 3, p. 179-182, 1996.

KING, B.A.; WALL, R.W. Distributed Instrumentation for Optimum Control of Variable Speed Electric Pumping Plants with Center Pivots. **Appl. Eng. Agric.**, [S.l.], v. 16, p. 45-50, 2000.

LIMA, S. C. R. V. *et al.* Comportamento de reguladores de pressão para pivô central após modificação interna. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, [S.l.], v. 1, n. 1, 2013.

- MA, Z.; WANG, S. Energy efficient control of variable speed pumps in complex building central air-conditioning systems. **Energy and Buildings**, [S.l.], v. 41, n. 2, p. 197-205, 2009.
- MATTOS, E.E. de; FALCO, R. de. **Bombas Industriais**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. 474 p.
- MESQUITA, A. L. A *et al.* Aspectos importantes na utilização de bombas centrífugas em velocidade variável para a redução do consumo de energia. *In: SEREA-SEMINÁRIO IBEROAMERICANO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA*, 2006a, 6., João Pessoa. **Anais [...]**, João Pessoa: Universidade Federal do Pará, 2006a. p. 1-15.
- MIRCEVSKI, S. A.; KOSTIC, Z. A.; ANDONOV, Z. L. Energy saving with pump's AC adjustable speed drives. *In: MELECON'98. 9th MEDITERRANEAN ELECTROTECHNICAL CONFERENCE. PROCEEDINGS* (Cat. No. 98CH36056). **Anais [...]**, IEEE, 1998.
- NERYS, J. W.L. *et al.* Conversor de Frequência Aplicado na Eficientização de Sistemas de Irrigação do Tipo Pivô Central. **Eletrônica de Potência**, Florianópolis, v. 11, p. 189-197, 2006.
- OLIVEIRA FILHO, D.; SAMPAIO, R. P.; MORAES, M. J.; PIZZIOLO, T. A.; DAMIÃO, J. H. A. C. Metodologia de diagnóstico energético em estação de captação de água. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.l.], v. 15, n. 10, p. 1097-1103, 2011.
- PEREIRA, P. H. C. *et al.* O uso da engenharia de automação na redução do consumo de energia elétrica em um sistema de irrigação por pivô central. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE*, 2013, [S.n.], Fortaleza. **Proceedings [...]**, Fortaleza, 2013. 6 p.
- PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos, SP: EESC-USP, 2006.
- ROSSMAN, L. A. *et al.* **Epanet 2 users manual, us environmental protection agency**. Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH, v. 45268, 2000.
- SENAI. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. **Fundamentos de instrumentação: pressão / nível / vazão / temperatura**. São Paulo: SENAI-SP, 2015.
- SENNINGER. **Guia regulador de pressão**. 2023. Hunter Industries. Disponível em: <https://www.senninger.com/sites/senninger.hunterindustries.com/files/pressure-regulator-guide-pt.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2023.
- SIQUEIRA, A. M.; SALES, J. A. **Estudo da viabilidade técnica para implantação de inversor de frequência no booster morro do escorpião**. 2016. TCC. (Curso de Engenharia Elétrica) - Superior de Engenharia Elétrica, 2016.
- TARJUELO, J. M. M. B. **El riego por aspersión y su tecnología**. 1. ed. Madrid: Mundi Prensa, 1994, 491p.

TIAGO FILHO, G. L. **Uso de bombas com rotação variável**. Itajubá: EFEI, 1996.

TODINI, E.; PILATI, S. A gradient algorithm for the analysis of pipe networks. Systems analysis and simulation. **Computer Applications In Water Supply**, [S.l.], v. 1, p. 1-20, 1988.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). Porto Alegre/RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.

USDA. Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Variable Speed Drive (VSD) for Irrigation Pumping Tech Note. **Water Management Technical Note**, [S.l.], n. 1, 2014.

Disponível em:

<https://directives.sc.gov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=36264.wba>. Acesso em: 06 fev. 2023.

VON BERNUTH, R.D.; BAIRD, D Characterizing pressure regulator performance Transactions, **ASAE**, [S.l.], v. 33, n. 1, p. 145-50, 1990.

WEG, E. E. S. **CFW 500- Inversor de frequência**. WEG Equipamentos Elétricos, Jaraguá do Sul, 2022.

WEG, E. E. S. **Guia de Especificação de Motores Elétricos**. 2021. WEG Equipamentos Elétricos. Jaraguá do Sul, 2009. Disponível em:

<https://static2.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2023.

WEG, E. E. S. **Guia Técnico**. Motores de Indução alimentados por Inversores de Frequência PWM. WEG Equipamentos Elétricos. Jaraguá do Sul, 2009.

WEG, E.E.S. **Guia de Aplicação de Inversores de Frequência**. WEG Equipamentos Elétricos, Jaraguá do Sul, 2005. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/36891224/Guia-de-Aplicacao-de-Inversores-de-Frequencia-WEG-3%C2%AA-Edica>. Acessado em: 19 jul. 2022.

WEG, E.E.S. **Catálogo eletrônico 2000**. WEG Equipamentos Elétricos, Jaraguá do Sul, 2000. Disponível em: <http://www.weg.com.br>. Acesso em: 19 jul. 2022.

OMEGA. **Transdutor de pressão**. Disponível em: <https://br.omega.com/pptst/PX309.html>  
WIKA. Acesso em: 18 abr. 2023.

## ANEXOS

Tabela 7 - ( $\alpha_{T(J)}$ ), alturas manométricas totais ( $HMT_{T(J)} (m)$ ), rendimentos da bomba ( $\eta_{b,T(J)}$ ), rendimentos do motor ( $\eta_{m,T(J)}$ ), as vazões bombeadas ( $Q_{T,(J)} (m^3/h)$ ), potências mecânicas ( $Pot_{MecT,(J)}(kW)$ ), carregamentos (K), rendimentos do inversor ( $\eta_i$ ) e os consumos específicos de energia elétrica ( $CE_{T,(J)} (kWh/m^3)$ ) para o Monitoramento Total (T) do pivô central 1. (continua)

$N_N(\text{rpm})$		<b>1750</b>											
<b>Posição</b>	$\alpha = N/N_N$	$\alpha^* N_r (\text{rpm})$	$HMT_{T(J)}(m)$	$Q (m^3/h)$	$Q (m^3/h)/(N_N^* \alpha)$	$\eta_{bT(J)}$	<b>Pot nominal</b> <sub>(kW)</sub>	<b>Pot.</b> Mec(kW)	<b>K</b>	$\eta_{mT(J)}$	$\eta_i$	<b>CE</b> kWh/m <sup>3</sup>	
<b>10</b>	0.8031	1405	67.4066	396.13	0.2818	0.69	185.00	104.96	0.57	0.93	0.94	0.3030	
<b>20</b>	0.8031	1405	67.4066	396.13	0.2818	0.69	185.00	104.96	0.57	0.93	0.94	0.3030	
<b>30</b>	0.8031	1405	67.4066	396.13	0.2818	0.69	185.00	104.96	0.57	0.93	0.94	0.3030	
<b>40</b>	0.8031	1405	67.4066	396.13	0.2818	0.69	185.00	104.96	0.57	0.93	0.94	0.3030	
<b>50</b>	0.8031	1405	67.4066	396.13	0.2818	0.69	185.00	104.96	0.57	0.93	0.94	0.3030	
<b>60</b>	0.8031	1405	67.4066	396.13	0.2818	0.69	185.00	104.96	0.57	0.93	0.94	0.3030	
<b>70</b>	0.8031	1405	67.4066	396.13	0.2818	0.69	185.00	104.96	0.57	0.93	0.94	0.3030	
<b>80</b>	0.8062	1411	68.1333	396.13	0.2808	0.70	185.00	105.75	0.57	0.93	0.94	0.3051	
<b>90</b>	0.8198	1435	71.4453	396.13	0.2761	0.70	185.00	109.38	0.59	0.93	0.94	0.3150	
<b>100</b>	0.8347	1461	75.1391	396.13	0.2712	0.71	185.00	113.47	0.61	0.93	0.94	0.3262	
<b>110</b>	0.8493	1486	78.8083	396.13	0.2665	0.72	185.00	117.58	0.64	0.94	0.94	0.3375	
<b>120</b>	0.8632	1511	82.3957	396.13	0.2622	0.73	185.00	121.64	0.66	0.94	0.94	0.3487	
<b>130</b>	0.8758	1533	85.6785	396.13	0.2585	0.74	185.00	125.39	0.68	0.94	0.94	0.3591	
<b>140</b>	0.8903	1558	89.5285	396.13	0.2543	0.74	185.00	129.83	0.70	0.94	0.94	0.3714	
<b>150</b>	0.9096	1592	94.7757	396.13	0.2489	0.75	185.00	135.95	0.73	0.94	0.94	0.3884	
<b>160</b>	0.9285	1625	100.0157	396.13	0.2438	0.76	185.00	142.13	0.77	0.94	0.94	0.4057	
<b>170</b>	0.9477	1659	105.4857	396.13	0.2388	0.77	185.00	148.66	0.80	0.94	0.94	0.4241	
<b>180</b>	0.9673	1693	111.1560	396.13	0.2340	0.77	185.00	155.50	0.84	0.94	0.94	0.4434	
<b>190</b>	0.9724	1702	112.6757	396.13	0.2328	0.77	185.00	157.35	0.85	0.94	0.94	0.4486	
<b>200</b>	0.9769	1710	113.9952	396.13	0.2317	0.77	185.00	158.96	0.86	0.94	0.94	0.4531	

Tabela 7 - ( $\alpha_{T(J)}$ ), alturas manométricas totais ( $HMT_{T(J)} (m)$ ), rendimentos da bomba ( $\eta_{b,T(J)}$ ), rendimentos do motor ( $\eta_{m,T(J)}$ ), as vazões bombeadas ( $Q_{T(J)} (m^3/h)$ ), potências mecânicas ( $Pot_{MecT,(J)}(kW)$ ), carregamentos (K), rendimentos do inversor ( $\eta_i$ ) e os consumos específicos de energia elétrica ( $CE_{T,(J)} (kWh/m^3)$ ) para o Monitoramento Total (T) do pivô central 1. (conclusão)

	$N_N(\text{rpm})$	<b>1750</b>										
<b>Posição</b>	$\alpha = N/N_N$	$\alpha * N_r (\text{rpm})$	$HMT_{T(J)}(m)$	$Q (m^3/h)$	$Q (m^3/h)/(N_N * \alpha)$	$\eta_{bT(J)}$	<b>Pot nominal</b> (kW)	<b>Pot. Mec</b> (kW)	<b>K</b>	$\eta_{mT(J)}$	$\eta_i$	$CE_{kWh/m^3}$
<b>210</b>	0.9639	1687	110.1851	396.13	0.2348	0.77	185.00	154.33	0.83	0.94	0.94	0.4400
<b>220</b>	0.9263	1621	99.4109	396.13	0.2444	0.76	185.00	141.41	0.76	0.94	0.94	0.4037
<b>230</b>	0.9299	1627	100.4174	396.13	0.2434	0.76	185.00	142.60	0.77	0.94	0.94	0.4071
<b>240</b>	0.9264	1621	99.4398	396.13	0.2443	0.76	185.00	141.44	0.76	0.94	0.94	0.4038
<b>250</b>	0.9138	1599	95.9231	396.13	0.2477	0.75	185.00	137.29	0.74	0.94	0.94	0.3922
<b>260</b>	0.9021	1579	92.7331	396.13	0.2509	0.75	185.00	133.56	0.72	0.94	0.94	0.3818
<b>270</b>	0.8989	1573	91.8597	396.13	0.2518	0.75	185.00	132.54	0.72	0.94	0.94	0.3789
<b>280</b>	0.8868	1552	88.5897	396.13	0.2553	0.74	185.00	128.74	0.70	0.94	0.94	0.3684
<b>290</b>	0.8709	1524	84.3790	396.13	0.2599	0.73	185.00	123.91	0.67	0.94	0.94	0.3549
<b>300</b>	0.8594	1504	81.4068	396.13	0.2634	0.73	185.00	120.52	0.65	0.94	0.94	0.3456
<b>310</b>	0.8502	1488	79.0368	396.13	0.2662	0.72	185.00	117.84	0.64	0.94	0.94	0.3382
<b>320</b>	0.8415	1473	76.8233	396.13	0.2690	0.72	185.00	115.35	0.62	0.93	0.94	0.3314
<b>330</b>	0.8287	1450	73.6474	396.13	0.2731	0.71	185.00	111.81	0.60	0.93	0.94	0.3217
<b>340</b>	0.8176	1431	70.9040	396.13	0.2769	0.70	185.00	108.78	0.59	0.93	0.94	0.3134
<b>350</b>	0.8080	1414	68.5795	396.13	0.2801	0.70	185.00	106.24	0.57	0.93	0.94	0.3064
<b>360</b>	0.8031	1405	67.4066	396.13	0.2818	0.69	185.00	104.96	0.57	0.93	0.94	0.3030
											Média	0.3566

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 8 - ( $\alpha_{P(J)}$ ), alturas manométricas totais ( $HMT_{P(J)} (m)$ ), rendimentos da bomba ( $\eta_{b,P(J)}$ ), rendimentos do motor ( $\eta_{m,P(J)}$ ), as vazões bombeadas ( $Q_{P,(J)} (m^3/h)$ ), potências mecânicas ( $Pot_{Mec P,(J)}(kW)$ ), carregamentos ( $K$ ), rendimentos do inversor ( $\eta_i$ ) e os consumos específicos de energia elétrica ( $CE_{P,(J)} (kWh/m^3)$ ) para a estratégia de Monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) do pivô central 1. (continua)

Nr(rpm)		1750										
Posição	$\alpha = N/N_N$	$\alpha * Nr (rpm)$	$HMT_{T(J)}(m)$	$Q (m^3/h)$	$Q (m^3/h)/(N_n * \alpha)$	$\eta_{bT(J)}$	Pot nominal(kw)	Pot. Mec(kw)	K	$\eta_{mT(J)}$	$\eta_i$	CE $kWh/m^3$
10	0.8304	1453	74.0466	396.13	0.2726	0.71	185.00	112.26	0.61	0.93	0.94	0.3229
20	0.8304	1453	74.0466	396.13	0.2726	0.71	185.00	112.26	0.61	0.93	0.94	0.3229
30	0.8304	1453	74.0466	396.13	0.2726	0.71	185.00	112.26	0.61	0.93	0.94	0.3229
40	0.8304	1453	74.0466	396.13	0.2726	0.71	185.00	112.26	0.61	0.93	0.94	0.3229
50	0.8304	1453	74.0466	396.13	0.2726	0.71	185.00	112.26	0.61	0.93	0.94	0.3229
60	0.8304	1453	74.0466	396.13	0.2726	0.71	185.00	112.26	0.61	0.93	0.94	0.3229
70	0.8304	1453	74.0466	396.13	0.2726	0.71	185.00	112.26	0.61	0.93	0.94	0.3229
80	0.8304	1453	74.0466	396.13	0.2726	0.71	185.00	112.26	0.61	0.93	0.94	0.3229
90	0.8410	1472	76.7160	396.13	0.2691	0.72	185.00	115.23	0.62	0.93	0.94	0.3310
100	0.8573	1500	80.8560	396.13	0.2640	0.73	185.00	119.90	0.65	0.94	0.94	0.3439
110	0.8725	1527	84.8060	396.13	0.2594	0.74	185.00	124.39	0.67	0.94	0.94	0.3563
120	0.8859	1550	88.3660	396.13	0.2555	0.74	185.00	128.49	0.69	0.94	0.94	0.3677
130	0.8990	1573	91.8860	396.13	0.2518	0.75	185.00	132.57	0.72	0.94	0.94	0.3790
140	0.9134	1598	95.8260	396.13	0.2478	0.75	185.00	137.18	0.74	0.94	0.94	0.3919
150	0.9298	1627	100.3860	396.13	0.2435	0.76	185.00	142.57	0.77	0.94	0.94	0.4070
160	0.9476	1658	105.4360	396.13	0.2389	0.77	185.00	148.60	0.80	0.94	0.94	0.4239
170	0.9683	1695	111.4660	396.13	0.2338	0.77	185.00	155.88	0.84	0.94	0.94	0.4444
180	0.9896	1732	117.7960	396.13	0.2287	0.78	185.00	163.62	0.88	0.94	0.94	0.4663
190	0.9926	1737	118.6960	396.13	0.2281	0.78	185.00	164.73	0.89	0.94	0.94	0.4694
200	0.9782	1712	114.3960	396.13	0.2314	0.77	185.00	159.45	0.86	0.94	0.94	0.4545
210	0.9554	1672	107.6860	396.13	0.2369	0.77	185.00	151.30	0.82	0.94	0.94	0.4315
220	0.9511	1664	106.4626	396.13	0.2380	0.77	185.00	149.83	0.81	0.94	0.94	0.4125
230	0.9097	1592	94.7960	396.13	0.2488	0.75	185.00	135.97	0.73	0.94	0.94	0.3885
240	0.9059	1585	93.7560	396.13	0.2499	0.75	185.00	134.75	0.73	0.94	0.94	0.3851

Tabela 8 - ( $\alpha_{P(J)}$ ), alturas manométricas totais ( $HMT_{P(J)} (m)$ ), rendimentos da bomba ( $\eta_{b,P(J)}$ ), rendimentos do motor ( $\eta_{m,P(J)}$ ), as vazões bombeadas ( $Q_{P,(J)} (m^3/h)$ ), potências mecânicas ( $Pot_{Mec P,(J)}(kW)$ ), carregamentos ( $K$ ), rendimentos do inversor ( $\eta_i$ ) e os consumos específicos de energia elétrica ( $CE_{P,(J)} (kWh/m^3)$ ) para a estratégia de Monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) do pivô central 1 (conclusão)

Nr(rpm)		1750										
Posição	$\alpha = N/N_N$	$\alpha * Nr (rpm)$	$HMT_{T(J)}(m)$	$Q (m^3/h)$	$Q (m^3/h)/(N_n * \alpha)$	$\eta_{bT(J)}$	Pot nominal(kw)	Pot. Mec(kw)	K	$\eta_{mT(J)}$	$\eta_i$	CE $kWh/m^3$
250	0.8967	1569	91.2660	396.13	0.2524	0.75	185.00	131.85	0.71	0.94	0.94	0.3770
270	0.8862	1551	88.4260	396.13	0.2554	0.74	185.00	128.56	0.69	0.94	0.94	0.3678
280	0.8765	1534	85.8560	396.13	0.2583	0.74	185.00	125.60	0.68	0.94	0.94	0.3596
290	0.8656	1515	82.9960	396.13	0.2615	0.73	185.00	122.33	0.66	0.94	0.94	0.3506
300	0.8656	1515	82.9960	396.13	0.2615	0.73	185.00	122.33	0.66	0.94	0.94	0.3506
310	0.8641	1512	82.6060	396.13	0.2620	0.73	185.00	121.88	0.66	0.94	0.94	0.3493
320	0.8508	1489	79.2060	396.13	0.2660	0.72	185.00	118.03	0.64	0.94	0.94	0.3387
330	0.8386	1467	76.0960	396.13	0.2699	0.72	185.00	114.54	0.62	0.93	0.94	0.3291
340	0.8304	1453	74.0466	396.13	0.2726	0.71	185.00	112.26	0.61	0.93	0.94	0.3229
350	0.8304	1453	74.0466	396.13	0.2726	0.71	185.00	112.26	0.61	0.93	0.94	0.3229
360	0.8304	1453	74.0466	396.13	0.2726	0.71	185.00	112.26	0.61	0.93	0.94	0.3229
											Média	0.3666

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 9 - ( $\alpha_{EO(J)}$ ), alturas manométricas totais ( $HMT_{EO(J)}(m)$ ), rendimentos da bomba ( $\eta_{b,EO(J)}$ ), rendimentos do motor ( $\eta_{m,EO(J)}$ ), as vazões bombeadas ( $Q_{(J)}(m^3/h)$ ), potências mecânicas ( $Pot_{Mec EO(J)}(kW)$ ), carregamentos (K), rendimentos do inversor ( $\eta_i$ ) e os consumos específicos de energia elétrica ( $CE_{EO(J)}(kWh/m^3)$ ) para a estratégia de Monitoramento Otimizado das Extremidades (EO) pivô central 1. (continua)

Nr(rpm)		1750													
Posição	$\alpha = N/N_N$	$\alpha * Nr$ (rpm)	HMT			$\eta_{bEO(J)}$	Pot nominal(kW)	Pot. Mec(kW)	K	$\eta_{mEO(J)}$	$\eta_i$	CE $kWh/m^3$			
			EO(J)(m)	Q ( $m^3/h$ )	Q ( $m^3/h$ )/( $N_n * \alpha$ )										
10	0.8490	1486	78.7473	396.13	0.2666	0.72	185.00	117.52	0.64	0.94	0.94	0.3373			
20	0.8490	1486	78.7278	396.13	0.2666	0.72	185.00	117.49	0.64	0.94	0.94	0.3372			
30	0.8497	1487	78.9115	396.13	0.2664	0.72	185.00	117.70	0.64	0.94	0.94	0.3378			
40	0.8488	1485	78.6972	396.13	0.2667	0.72	185.00	117.46	0.63	0.94	0.94	0.3371			
50	0.8488	1485	78.6872	396.13	0.2667	0.72	185.00	117.45	0.63	0.94	0.94	0.3371			
60	0.8488	1485	78.6872	396.13	0.2667	0.72	185.00	117.45	0.63	0.94	0.94	0.3371			
70	0.8489	1486	78.7072	396.13	0.2667	0.72	185.00	117.47	0.63	0.94	0.94	0.3372			
80	0.8492	1486	78.7783	396.13	0.2666	0.72	185.00	117.55	0.64	0.94	0.94	0.3374			
90	0.8632	1511	82.3859	396.13	0.2622	0.73	185.00	121.63	0.66	0.94	0.94	0.3487			
100	0.8790	1538	86.5188	396.13	0.2575	0.74	185.00	126.36	0.68	0.94	0.94	0.3617			
110	0.8938	1564	90.4745	396.13	0.2533	0.75	185.00	130.93	0.71	0.94	0.94	0.3744			
120	0.9069	1587	94.0324	396.13	0.2496	0.75	185.00	135.07	0.73	0.94	0.94	0.3860			
130	0.9195	1609	97.5123	396.13	0.2462	0.76	185.00	139.16	0.75	0.94	0.94	0.3974			
140	0.9334	1634	101.4114	396.13	0.2425	0.76	185.00	143.79	0.78	0.94	0.94	0.4104			
150	0.9497	1662	106.0518	396.13	0.2383	0.77	185.00	149.34	0.81	0.94	0.94	0.4260			
160	0.9671	1692	111.1200	396.13	0.2341	0.77	185.00	155.46	0.84	0.94	0.94	0.4432			
170	0.9873	1728	117.1029	396.13	0.2293	0.78	185.00	162.77	0.88	0.94	0.94	0.4639			
180	1.0083	1764	123.4728	396.13	0.2245	0.78	185.00	170.65	0.92	0.94	0.94	0.4861			
190	1.0145	1775	125.3855	396.13	0.2231	0.78	185.00	173.03	0.94	0.94	0.94	0.4929			
200	0.9971	1745	120.0677	396.13	0.2270	0.78	185.00	166.43	0.90	0.94	0.94	0.4742			
210	0.9748	1706	113.3744	396.13	0.2322	0.77	185.00	158.21	0.86	0.94	0.94	0.4510			
250	0.9175	1606	96.9481	396.13	0.2467	0.76	185.00	138.50	0.75	0.94	0.94	0.3956			

Tabela 9 - ( $\alpha_{EO(J)}$ ), alturas manométricas totais ( $HMT_{EO(J)}(m)$ ), rendimentos da bomba ( $\eta_{b,EO(J)}$ ), rendimentos do motor ( $\eta_{m,EO(J)}$ ), as vazões bombeadas ( $Q_{(J)}(m^3/h)$ ), potências mecânicas ( $Pot_{Mec EO(J)}(kW)$ ), carregamentos (K), rendimentos do inversor ( $\eta_i$ ) e os consumos específicos de energia elétrica ( $CE_{EO(J)}(kWh/m^3)$ ) para a estratégia de Monitoramento Otimizado das Extremidades (EO) pivô central 1. (conclusão)

Nr(rpm)		1750											
Posição	$\alpha = N/N_N$	$\alpha * Nr$ (rpm)	HMT			$\eta_{bEO(J)}$	Pot nominal(kW)	Pot. Mec(kW)	K	$\eta_{mEO(J)}$	$\eta_i$	CE $kWh/m^3$	
			EO(J)(m)	Q ( $m^3/h$ )	Q ( $m^3/h$ )/(N <sub>n</sub> * $\alpha$ )								
260	0.9116	1595	95.3268	396.13	0.2483	0.75	185.00	136.59	0.74	0.94	0.94	0.3902	
270	0.9072	1588	94.1063	396.13	0.2495	0.75	185.00	135.16	0.73	0.94	0.94	0.3863	
280	0.8977	1571	91.5348	396.13	0.2521	0.75	185.00	132.16	0.71	0.94	0.94	0.3779	
290	0.8871	1552	88.6728	396.13	0.2552	0.74	185.00	128.84	0.70	0.94	0.94	0.3686	
300	0.8871	1552	88.6710	396.13	0.2552	0.74	185.00	128.84	0.70	0.94	0.94	0.3686	
310	0.8856	1550	88.2800	396.13	0.2556	0.74	185.00	128.39	0.69	0.94	0.94	0.3674	
320	0.8728	1527	84.8788	396.13	0.2594	0.74	185.00	124.48	0.67	0.94	0.94	0.3565	
330	0.8608	1506	81.7670	396.13	0.2630	0.73	185.00	120.93	0.65	0.94	0.94	0.3467	
340	0.8496	1487	78.8898	396.13	0.2664	0.72	185.00	117.68	0.64	0.94	0.94	0.3377	
350	0.8494	1486	78.8286	396.13	0.2665	0.72	185.00	117.61	0.64	0.94	0.94	0.3375	
360	0.8492	1486	78.7778	396.13	0.2666	0.72	185.00	117.55	0.64	0.94	0.94	0.3374	
											Média	0.3842	

Fonte: Do autor (2023)

Tabela 10 - ( $\alpha_{T(J)}$ ), alturas manométricas totais ( $HMT_{T(J)} (m)$ ), rendimentos da bomba( $\eta_{b,T(J)}$ ), rendimentos do motor(  $\eta_{m,T(J)}$ ), as vazões bombeadas ( $Q_{T,(J)} (m^3/h)$ ), potências mecânicas( $Pot_{MecT,(J)}(kW)$ ), carregamentos (K), rendimentos do inversor ( $\eta_i$ ) e os consumos específicos de energia elétrica ( $CE_{T,(J)} (kWh/m^3)$ ) para o Monitoramento Total (T) do pivô central 2. (continua)

Nr		1750										
Posição	$\alpha = N/N_N$	N/Nr (rpm)	HMT <sub>T(J)(m)</sub>	Q (m <sup>3</sup> /h)	Q (m <sup>3</sup> /h)/(N <sub>n</sub> * $\alpha$ )	$\eta_{bT(J)}$	Pot nominal(kW)	Pot. Mec(kW)	K	$\eta_{mT(J)}$	$\eta_i$	CE kWh/m <sup>3</sup>
10	0.9038	1582	100.4808	203.36	0.1286	0.78	110	71.12	0.64	0.92	0.94	0.4043
20	0.8929	1563	97.4820	203.36	0.1301	0.78	110	69.14	0.63	0.92	0.94	0.3938
30	0.8757	1533	92.8554	203.36	0.1327	0.78	110	66.13	0.60	0.92	0.94	0.3778
40	0.8612	1507	89.0060	203.36	0.1349	0.77	110	63.66	0.58	0.91	0.94	0.3649
50	0.8473	1483	85.3943	203.36	0.1371	0.77	110	61.38	0.56	0.91	0.94	0.3529
60	0.8312	1455	81.2923	203.36	0.1398	0.77	110	58.83	0.53	0.91	0.94	0.3397
70	0.8160	1428	77.4652	203.36	0.1424	0.76	110	56.50	0.51	0.90	0.94	0.3278
80	0.8013	1402	73.8479	203.36	0.1450	0.75	110	54.33	0.49	0.90	0.94	0.3167
90	0.7881	1379	70.6665	203.36	0.1475	0.75	110	52.46	0.48	0.89	0.94	0.3073
100	0.7777	1361	68.1968	203.36	0.1494	0.74	110	51.04	0.46	0.89	0.94	0.3002
110	0.7703	1348	66.4751	203.36	0.1508	0.74	110	50.06	0.45	0.89	0.94	0.2953
120	0.7703	1348	66.4541	203.36	0.1509	0.74	110	50.05	0.45	0.89	0.94	0.2952
130	0.7660	1341	65.4742	203.36	0.1517	0.73	110	49.50	0.45	0.89	0.94	0.2925
140	0.7692	1346	66.2162	203.36	0.1511	0.73	110	49.92	0.45	0.89	0.94	0.2946
150	0.7660	1340	65.4541	203.36	0.1517	0.73	110	49.49	0.45	0.89	0.94	0.2924
160	0.7660	1340	65.4541	203.36	0.1517	0.73	110	49.49	0.45	0.89	0.94	0.2924
170	0.7660	1340	65.4541	203.36	0.1517	0.73	110	49.49	0.45	0.89	0.94	0.2924
180	0.7660	1340	65.4541	203.36	0.1517	0.73	110	49.49	0.45	0.89	0.94	0.2924
190	0.7660	1341	65.4642	203.36	0.1517	0.73	110	49.49	0.45	0.89	0.94	0.2925
200	0.7660	1341	65.4742	203.36	0.1517	0.73	110	49.50	0.45	0.89	0.94	0.2925
210	0.7663	1341	65.5293	203.36	0.1516	0.73	110	49.53	0.45	0.89	0.94	0.2927
220	0.7709	1349	66.6076	203.36	0.1507	0.74	110	50.14	0.45	0.89	0.94	0.2957

Tabela 10 - ( $\alpha_{T(J)}$ ), alturas manométricas totais ( $HMT_{T(J)} (m)$ ), rendimentos da bomba( $\eta_{b,T(J)}$ ), rendimentos do motor( $\eta_{m,T(J)}$ ), as vazões bombeadas ( $Q_{T,(J)} (m^3/h)$ ), potências mecânicas( $Pot_{MecT,(J)}(kW)$ ), carregamentos ( $K$ ), rendimentos do inversor ( $\eta_i$ ) e os consumos específicos de energia elétrica ( $CE_{T,(J)} (kWh/m^3)$ ) para o Monitoramento Total (T) do pivô central 2. (conclusão)

	Nr	1750										
<b>Posição</b>	$\alpha = N/N_N$	$N/N_r (rpm)$	$HMT_{T(J)}(m)$	$Q (m^3/h)$	$Q (m^3/h)/(N_n * \alpha)$	$\eta_{bT(J)}$	<b>Pot nominal(kW)</b>	<b>Pot. Mec(kW)</b>	<b>K</b>	$\eta_{mT(J)}$	$\eta_i$	$CE_{kWh/m^3}$
<b>230</b>	0.7748	1356	67.5171	203.36	0.1500	0.74	110	50.65	0.46	0.89	0.94	0.2982
<b>240</b>	0.7795	1364	68.6265	203.36	0.1491	0.74	110	51.29	0.46	0.89	0.94	0.3014
<b>250</b>	0.7852	1374	69.9886	203.36	0.1480	0.74	110	52.07	0.47	0.89	0.94	0.3053
<b>260</b>	0.7924	1387	71.7102	203.36	0.1466	0.75	110	53.07	0.48	0.89	0.94	0.3104
<b>270</b>	0.8013	1402	73.8482	203.36	0.1450	0.75	110	54.33	0.49	0.90	0.94	0.3167
<b>280</b>	0.8102	1418	76.0453	203.36	0.1434	0.76	110	55.64	0.50	0.90	0.94	0.3234
<b>290</b>	0.8211	1437	78.7382	203.36	0.1415	0.76	110	57.27	0.52	0.90	0.94	0.3317
<b>300</b>	0.8334	1458	81.8362	203.36	0.1394	0.77	110	59.16	0.54	0.91	0.94	0.3415
<b>310</b>	0.8476	1483	85.4642	203.36	0.1371	0.77	110	61.42	0.56	0.91	0.94	0.3532
<b>320</b>	0.8640	1512	89.7431	203.36	0.1345	0.78	110	64.13	0.58	0.91	0.94	0.3673
<b>330</b>	0.8831	1545	94.8332	203.36	0.1316	0.78	110	67.41	0.61	0.92	0.94	0.3846
<b>340</b>	0.8961	1568	98.3617	203.36	0.1297	0.78	110	69.72	0.63	0.92	0.94	0.3969
<b>350</b>	0.9058	1585	101.0305	203.36	0.1283	0.78	110	71.49	0.65	0.92	0.94	0.4063
<b>360</b>	0.9088	1590	101.8602	203.36	0.1279	0.78	110	72.04	0.65	0.92	0.94	0.4093
											Média	0.3292

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 11 - ( $\alpha_{P(J)}$ ), alturas manométricas totais ( $HMT_{P(J)} (m)$ ), rendimentos da bomba( $\eta_{b,P(J)}$ ), rendimentos do motor(  $\eta_{m,P(J)}$ ), as vazões bombeadas ( $Q_{P,(J)} (m^3/h)$ ), potências mecânicas( $Pot_{Mec P,(J)}(kW)$ ), carregamentos (K), rendimentos do inversor ( $\eta_i$ ) e os consumos específicos de energia elétrica ( $CE_{P,(J)} (kWh/m^3)$ ) para a estratégia de Monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) do pivô central 2. (continua)

	Nr	1750										
<b>Posição</b>	$\alpha = N/N_N$	N/Nr (rpm)	$HMT_{P(J)}(m)$	$Q (m^3/h)$	$Q (m^3/h)/(N_n * \alpha)$	$\eta_{bP(J)}$	Pot nominal(kW)	Pot. Mec(kW)	K	$\eta_{mP(J)}$	$\eta_i$	CE $kWh/m^3$
<b>10</b>	0.9225	1614	105.6986	203.36	0.1260	0.78	110	74.62	0.68	0.92	0.94	0.4231
<b>20</b>	0.9118	1596	102.6998	203.36	0.1274	0.78	110	72.60	0.66	0.92	0.94	0.4123
<b>30</b>	0.8950	1566	98.0731	203.36	0.1298	0.78	110	69.53	0.63	0.92	0.94	0.3959
<b>40</b>	0.8808	1541	94.2236	203.36	0.1319	0.78	110	67.01	0.61	0.92	0.94	0.3825
<b>50</b>	0.8673	1518	90.6119	203.36	0.1340	0.78	110	64.69	0.59	0.91	0.94	0.3702
<b>60</b>	0.8516	1490	86.5098	203.36	0.1365	0.77	110	62.08	0.56	0.91	0.94	0.3566
<b>70</b>	0.8367	1464	82.6827	203.36	0.1389	0.77	110	59.69	0.54	0.91	0.94	0.3442
<b>80</b>	0.8224	1439	79.0652	203.36	0.1413	0.76	110	57.47	0.52	0.90	0.94	0.3327
<b>90</b>	0.8096	1417	75.8838	203.36	0.1435	0.76	110	55.54	0.50	0.90	0.94	0.3229
<b>100</b>	0.7995	1399	73.4139	203.36	0.1454	0.75	110	54.07	0.49	0.90	0.94	0.3154
<b>110</b>	0.7923	1387	71.6922	203.36	0.1467	0.75	110	53.06	0.48	0.89	0.94	0.3103
<b>120</b>	0.7923	1386	71.6713	203.36	0.1467	0.75	110	53.05	0.48	0.89	0.94	0.3103
<b>130</b>	0.7882	1379	70.6913	203.36	0.1474	0.75	110	52.48	0.48	0.89	0.94	0.3074
<b>140</b>	0.7913	1385	71.4333	203.36	0.1469	0.75	110	52.91	0.48	0.89	0.94	0.3096
<b>150</b>	0.7881	1379	70.6712	203.36	0.1475	0.75	110	52.47	0.48	0.89	0.94	0.3073
<b>160</b>	0.7881	1379	70.6712	203.36	0.1475	0.75	110	52.47	0.48	0.89	0.94	0.3073
<b>170</b>	0.7881	1379	70.6712	203.36	0.1475	0.75	110	52.47	0.48	0.89	0.94	0.3073
<b>180</b>	0.7881	1379	70.6712	203.36	0.1475	0.75	110	52.47	0.48	0.89	0.94	0.3073
<b>190</b>	0.7881	1379	70.6813	203.36	0.1474	0.75	110	52.47	0.48	0.89	0.94	0.3074
<b>200</b>	0.7882	1379	70.6913	203.36	0.1474	0.75	110	52.48	0.48	0.89	0.94	0.3074
<b>210</b>	0.7884	1380	70.7464	203.36	0.1474	0.75	110	52.51	0.48	0.89	0.94	0.3075
<b>250</b>	0.8068	1412	75.2058	203.36	0.1440	0.76	110	55.14	0.50	0.90	0.94	0.3208
<b>260</b>	0.8138	1424	76.9275	203.36	0.1428	0.76	110	56.17	0.51	0.90	0.94	0.3261

Tabela 11 - ( $\alpha_{P(J)}$ ), alturas manométricas totais ( $HMT_{P(J)} (m)$ ), rendimentos da bomba( $\eta_{b,P(J)}$ ), rendimentos do motor( $\eta_{m,P(J)}$ ), as vazões bombeadas ( $Q_{P,(J)} (m^3/h)$ ), potências mecânicas( $Pot_{Mec P,(J)}(kW)$ ), carregamentos ( $K$ ), rendimentos do inversor ( $\eta_i$ ) e os consumos específicos de energia elétrica ( $CE_{P,(J)} (kWh/m^3)$ ) para a estratégia de Monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) do pivô central 2. (conclusão)

Nr		1750										
Posição	$\alpha = N/N_N$	$N/N_r$ (rpm)	$HMT_{P(J)}(m)$	$Q (m^3/h)$	$Q (m^3/h)/(N_n*\alpha)$	$\eta_{bP(J)}$	Pot nominal(kW)	Pot. Mec(kW)	K	$\eta_{mP(J)}$	$\eta_i$	CE $kWh/m^3$
220	0.7929	1388	71.8248	203.36	0.1466	0.75	110	53.14	0.48	0.89	0.94	0.3107
230	0.7967	1394	72.7343	203.36	0.1459	0.75	110	53.67	0.49	0.90	0.94	0.3134
240	0.8012	1402	73.8437	203.36	0.1450	0.75	110	54.33	0.49	0.90	0.94	0.3167
270	0.8224	1439	79.0655	203.36	0.1413	0.76	110	57.47	0.52	0.90	0.94	0.3327
280	0.8311	1454	81.2627	203.36	0.1398	0.77	110	58.81	0.53	0.91	0.94	0.3396
290	0.8417	1473	83.9557	203.36	0.1381	0.77	110	60.48	0.55	0.91	0.94	0.3483
300	0.8537	1494	87.0537	203.36	0.1361	0.77	110	62.42	0.57	0.91	0.94	0.3584
310	0.8675	1518	90.6818	203.36	0.1339	0.78	110	64.73	0.59	0.91	0.94	0.3705
320	0.8836	1546	94.9607	203.36	0.1315	0.78	110	67.49	0.61	0.92	0.94	0.3851
330	0.9022	1579	100.0509	203.36	0.1288	0.78	110	70.84	0.64	0.92	0.94	0.4028
340	0.9150	1601	103.5795	203.36	0.1270	0.78	110	73.19	0.66	0.92	0.94	0.4154
350	0.9245	1618	106.2484	203.36	0.1257	0.78	110	74.99	0.68	0.92	0.94	0.4251
360	0.9274	1623	107.0781	203.36	0.1253	0.79	110	75.55	0.68	0.92	0.94	0.4281
											Média	0.3455

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 12 - ( $\alpha_{EO(J)}$ ), alturas manométricas totais ( $HMT_{EO(J)}$  (m)), rendimentos da bomba( $\eta_{b,EO(J)}$ ), rendimentos do motor( $\eta_{m,EO(J)}$ ), as vazões bombeadas ( $Q_{(J)}$  ( $m^3/h$ )), potências mecânicas( $Pot_{Mec EO,(J)}$ (kW)),carregamentos (K), rendimentos do inversor ( $\eta_i$ ) e os consumos específicos de energia elétrica ( $CE_{EO,(J)}$  ( $kWh/m^3$ )) para a estratégia de Monitoramento Otimizado das Extremidades (EO) do pivô central 2. (continua)

Nr		1750										
Posição	$\alpha = N/N_N$	N/Nr (rpm)	HMT			$\eta_{bEO(J)}$	Pot nominal(kW)	Pot. Mec(kW)	K	$\eta_{mPO(J)}$	$\eta_i$	CE $kWh/m^3$
			EO(J)(m)	Q ( $m^3/h$ )	Q ( $m^3/h$ )/(Nn* $\alpha$ )							
10	0.9304	1628	107.9311	203.36	0.1249	0.79	110	76.13	0.69	0.92	0.94	0.4312
20	0.9198	1610	104.9315	203.36	0.1263	0.78	110	74.10	0.67	0.92	0.94	0.4203
30	0.9031	1580	100.2758	203.36	0.1287	0.78	110	70.99	0.64	0.92	0.94	0.4036
40	0.8851	1549	95.3657	203.36	0.1313	0.78	110	67.76	0.61	0.92	0.94	0.3864
50	0.8717	1525	91.7854	203.36	0.1333	0.78	110	65.44	0.59	0.91	0.94	0.3742
60	0.8508	1489	86.2957	203.36	0.1366	0.77	110	61.94	0.56	0.91	0.94	0.3559
70	0.8315	1455	81.3685	203.36	0.1397	0.77	110	58.88	0.53	0.91	0.94	0.3400
80	0.8158	1428	77.4255	203.36	0.1424	0.76	110	56.47	0.51	0.90	0.94	0.3276
90	0.7976	1396	72.9618	203.36	0.1457	0.75	110	53.81	0.49	0.90	0.94	0.3141
100	0.7975	1396	72.9418	203.36	0.1457	0.75	110	53.80	0.49	0.90	0.94	0.3140
110	0.7975	1396	72.9317	203.36	0.1457	0.75	110	53.79	0.49	0.90	0.94	0.3140
120	0.7975	1396	72.9318	203.36	0.1457	0.75	110	53.79	0.49	0.90	0.94	0.3140
130	0.7974	1395	72.9163	203.36	0.1457	0.75	110	53.78	0.49	0.90	0.94	0.3140
140	0.7975	1396	72.9318	203.36	0.1457	0.75	110	53.79	0.49	0.90	0.94	0.3140
150	0.7974	1395	72.9129	203.36	0.1457	0.75	110	53.78	0.49	0.90	0.94	0.3139
160	0.7973	1395	72.8887	203.36	0.1457	0.75	110	53.77	0.49	0.90	0.94	0.3139
170	0.7974	1395	72.9129	203.36	0.1457	0.75	110	53.78	0.49	0.90	0.94	0.3139
180	0.7973	1395	72.8887	203.36	0.1457	0.75	110	53.77	0.49	0.90	0.94	0.3139
190	0.7973	1395	72.8963	203.36	0.1457	0.75	110	53.77	0.49	0.90	0.94	0.3139
200	0.7974	1395	72.9163	203.36	0.1457	0.75	110	53.78	0.49	0.90	0.94	0.3140
240	0.7976	1396	72.9579	203.36	0.1457	0.75	110	53.81	0.49	0.90	0.94	0.3141

Tabela 12 - ( $\alpha_{EO(J)}$ ), alturas manométricas totais ( $HMT_{EO(J)} (m)$ ), rendimentos da bomba( $\eta_{b,EO(J)}$ ), rendimentos do motor( $\eta_{m,EO(J)}$ ), as vazões bombeadas ( $Q_{(J)} (m^3/h)$ ), potências mecânicas( $Pot_{Mec EO,(J)}(kW)$ ), carregamentos ( $K$ ), rendimentos do inversor ( $\eta_i$ ) e os consumos específicos de energia elétrica ( $CE_{EO,(J)} (kWh/m^3)$ ) para a estratégia de Monitoramento Otimizado das Extremidades (EO) do pivô central 2. (conclusão)

Nr													
		1750											
Posição	$\alpha = N/N_N$	N/Nr (rpm)	HMT		$Q (m^3/h)$	$Q (m^3/h)/(N_n * \alpha)$	$\eta_{bEO(J)}$	Pot nominal(kW)	Pot. Mec(kW)	K	$\eta_{mPO(J)}$	$\eta_i$	CE $kWh/m^3$
			EO(J)(m)										
210	0.7974	1395	72.9118		203.36	0.1457	0.75	110	53.78	0.49	0.90	0.94	0.3139
220	0.7975	1396	72.9372		203.36	0.1457	0.75	110	53.79	0.49	0.90	0.94	0.3140
230	0.7975	1396	72.9318		203.36	0.1457	0.75	110	53.79	0.49	0.90	0.94	0.3140
250	0.7976	1396	72.9718		203.36	0.1457	0.75	110	53.81	0.49	0.90	0.94	0.3141
260	0.7976	1396	72.9614		203.36	0.1457	0.75	110	53.81	0.49	0.90	0.94	0.3141
270	0.8069	1412	75.2356		203.36	0.1440	0.76	110	55.16	0.50	0.90	0.94	0.3209
280	0.8194	1434	78.3156		203.36	0.1418	0.76	110	57.01	0.52	0.90	0.94	0.3304
290	0.8353	1462	82.3156		203.36	0.1391	0.77	110	59.46	0.54	0.91	0.94	0.3430
300	0.8531	1493	86.8957		203.36	0.1362	0.77	110	62.32	0.56	0.91	0.94	0.3579
310	0.8725	1527	92.0058		203.36	0.1332	0.78	110	65.58	0.59	0.91	0.94	0.3749
320	0.8912	1560	97.0260		203.36	0.1304	0.78	110	68.84	0.62	0.92	0.94	0.3922
330	0.9103	1593	102.2770		203.36	0.1277	0.78	110	72.32	0.66	0.92	0.94	0.4107
340	0.9229	1615	105.8071		203.36	0.1259	0.78	110	74.69	0.68	0.92	0.94	0.4235
350	0.9323	1632	108.4783		203.36	0.1246	0.79	110	76.50	0.69	0.92	0.94	0.4332
360	0.9352	1637	109.3070		203.36	0.1243	0.79	110	77.07	0.70	0.92	0.94	0.4363
												Média	0.3476

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 13 - Valores de cotas das torres para cada angulação ( $\theta$ ) da posição 10° a 120° e os  $\alpha$  para Monitoramento Total (T), Estratégia de monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) e Monitoramento Otimizado das Extremidades(EO) para o pivô central 1.

Torre	Cota da torre na angulação ( $\theta$ )											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
1	603.70	603.54	603.39	603.29	603.30	603.43	603.52	603.85	604.14	604.38	604.74	605.12
2	601.73	601.24	601.03	601.02	600.95	601.08	601.46	601.80	602.32	603.03	603.78	604.46
3	599.60	599.12	598.71	598.61	598.69	598.87	599.33	599.95	600.79	601.72	602.87	604.03
4	597.61	596.91	596.46	596.23	596.29	596.59	597.30	598.10	599.25	600.44	602.03	603.50
5	595.45	594.68	594.10	593.86	593.96	594.41	595.22	596.29	597.70	599.19	601.06	602.97
6	593.29	592.40	591.80	591.67	591.83	592.43	593.29	594.69	596.37	598.25	600.29	602.46
7	591.35	590.37	589.76	589.71	589.82	590.40	591.44	592.98	594.85	596.98	599.60	602.09
8	589.68	588.45	587.74	587.49	587.77	588.48	589.61	591.37	593.60	596.01	598.61	601.92
9	587.95	586.60	585.70	585.18	585.59	586.59	588.05	589.90	592.34	594.97	597.99	601.17
10	586.11	584.79	583.78	583.03	583.30	584.48	586.49	588.66	591.17	594.14	597.30	600.48
11	584.38	582.88	581.55	580.76	580.95	582.15	584.73	587.23	590.04	593.29	597.02	599.80
12	582.71	581.03	579.48	578.70	579.02	580.10	582.93	585.82	588.96	592.52	596.06	599.15
13	581.06	579.07	577.34	576.78	577.03	578.36	581.06	584.40	587.95	591.60	595.19	598.74
14	579.43	577.18	575.40	574.81	575.03	576.17	579.13	583.22	587.06	590.86	594.61	598.22
15	577.37	574.96	573.59	573.01	573.35	574.39	576.99	581.37	586.02	590.07	593.96	597.54
<b>Velocidade de rotação</b>												
<b>Sem uso do inversor (<math>\alpha=1</math>)</b>	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
$\alpha_{T(J)}$	0.8031	0.8031	0.8031	0.8031	0.8031	0.8031	0.8031	0.8062	0.8198	0.8347	0.8493	0.8632
$\alpha_{P(J)}$	0.8304	0.8304	0.8304	0.8304	0.8304	0.8304	0.8304	0.8304	0.8410	0.8573	0.8725	0.8859
$\alpha_{EO(J)}$	0.8490	0.8490	0.8497	0.8488	0.8488	0.8488	0.8489	0.8492	0.8632	0.8790	0.8938	0.9069

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 14 - Valores de cotas das torres para cada angulação ( $\theta$ ) da posição 130° a 250 ° e os  $\alpha$  para as estratégias de Monitoramento Total (T), Estratégia de monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) e Monitoramento Otimizado das Extremidades(EO) para o pivô central 1.

Torre	Cota da torre em cada angulação ( $\theta$ )												
	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
1	605.51	605.97	606.43	606.78	607.02	607.22	607.43	607.56	607.68	607.73	607.61	607.59	607.39
2	605.31	606.15	606.88	607.55	608.26	608.72	609.16	609.45	609.64	609.74	609.67	609.43	609.12
3	605.17	606.45	607.54	608.47	609.44	610.32	610.91	611.47	611.73	611.89	611.80	611.43	610.96
4	605.03	606.62	608.13	609.39	610.63	611.97	612.80	613.45	613.83	613.95	613.81	613.44	612.83
5	604.99	606.84	608.68	610.53	612.09	613.53	614.68	615.42	615.84	616.01	615.89	615.09	614.08
6	604.86	607.07	609.55	611.70	613.53	615.26	616.61	617.36	617.95	617.92	617.12	616.04	614.84
7	604.80	607.54	610.25	612.56	614.71	616.74	618.29	619.14	619.59	619.09	618.12	616.93	615.48
8	604.57	607.63	610.68	613.57	616.03	618.15	619.81	620.87	621.00	620.29	619.12	617.79	616.19
9	604.07	607.27	611.07	614.46	617.23	619.51	621.24	622.55	622.32	621.58	620.41	618.66	616.87
10	603.57	606.85	610.98	615.31	618.34	620.89	622.82	624.16	623.73	621.07	621.11	619.87	617.45
11	603.07	606.29	610.92	615.61	619.51	622.18	624.35	626.00	624.60	618.15	619.83	618.87	615.25
12	602.48	605.93	610.87	615.93	620.36	623.55	625.82	628.09	625.61	614.67	617.43	615.54	612.07
13	601.95	605.55	610.75	615.86	621.12	624.95	627.27	630.12	626.78	614.68	613.47	611.88	608.84
14	601.43	605.24	610.61	615.85	621.30	626.00	628.49	629.83	624.51	614.45	609.72	608.25	605.47
15	600.97	604.88	609.65	614.75	620.63	626.54	627.85	624.99	618.64	612.40	605.27	604.12	601.55
<b>Velocidade de rotação</b>													
<b>Sem uso do inversor (<math>\alpha=1</math>)</b>	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
$\alpha_{T(J)}$	0.8758	0.8903	0.9096	0.9285	0.9477	0.9673	0.9724	0.9769	0.9639	0.9263	0.9299	0.9264	0.9138
$\alpha_{P(J)}$	0.8990	0.9134	0.9298	0.9476	0.9683	0.9896	0.9926	0.9782	0.9554	0.9511	0.9097	0.9059	0.8967
$\alpha_{EO(J)}$	0.9195	0.9334	0.9497	0.9671	0.9873	1.0083	1.0145	0.9971	0.9748	0.9580	0.9301	0.9264	0.9175

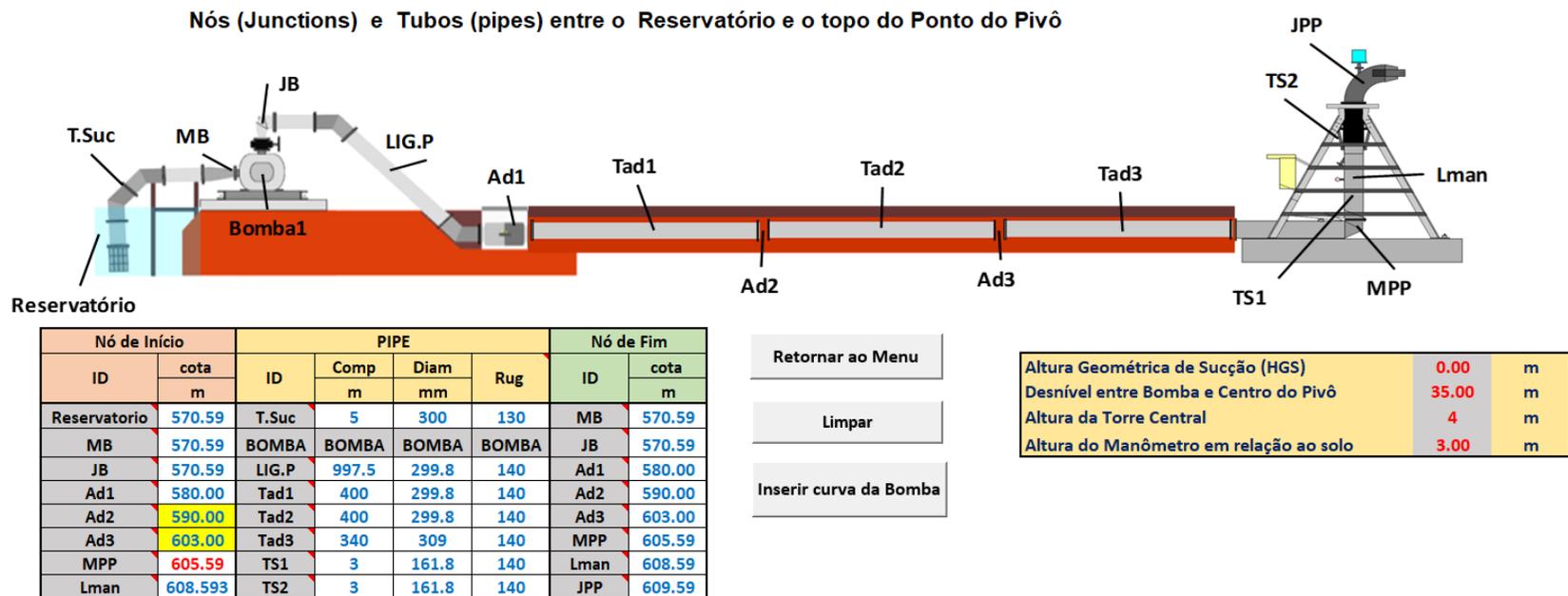
Fonte: Do autor (2023).

Tabela 15- Valores de cotas das torres para cada angulação ( $\theta$ ) da posição 250 ° a 360° e os  $\alpha$  para as estratégias de Monitoramento Total (T), Estratégia de monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) e Monitoramento Otimizado das Extremidades(EO) para o pivô central 1.

Torre	Cota da torre em cada posição angular (J)										
	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360
1	607.18	606.88	606.57	606.09	605.89	605.49	605.18	604.84	604.52	604.19	603.87
2	608.78	608.24	607.57	606.84	606.09	605.49	604.75	603.98	603.15	602.63	602.05
3	610.35	609.63	608.68	607.58	606.37	605.47	604.23	603.06	602.25	601.05	600.30
4	611.97	610.97	609.76	608.32	606.73	605.29	603.72	602.08	600.90	599.53	598.38
5	612.92	611.77	610.52	609.10	606.85	604.84	602.80	600.98	599.20	598.02	596.48
6	613.50	612.02	610.49	608.83	606.73	604.22	601.87	599.73	597.74	596.12	594.59
7	613.94	612.33	610.89	608.65	605.89	603.53	600.84	598.55	596.47	594.44	592.92
8	614.42	612.63	611.12	607.67	605.23	602.36	600.01	597.32	595.02	592.95	591.21
9	614.59	612.54	610.44	606.30	603.91	601.42	598.52	595.96	593.59	591.36	589.58
10	614.24	612.37	609.39	604.93	602.27	600.16	597.17	594.54	591.96	589.73	587.95
11	612.08	611.28	608.01	603.44	600.64	598.35	595.90	593.05	590.25	587.97	586.18
12	609.03	608.38	605.59	602.08	599.06	596.64	594.52	591.03	588.47	586.08	584.43
13	606.10	605.11	602.36	600.23	597.33	595.05	593.02	589.10	586.02	584.07	582.71
14	603.09	602.10	599.43	597.16	595.75	593.79	591.17	587.40	583.53	581.92	580.87
15	599.74	598.57	595.98	593.27	592.91	592.12	588.91	585.63	580.75	579.68	578.59
<b>Velocidade de rotação</b>											
<b>Sem uso do inversor (<math>\alpha=1</math>)</b>	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
$\alpha_{T(J)}$	0.9021	0.8989	0.8868	0.8709	0.8594	0.8502	0.8415	0.8287	0.8176	0.8080	0.8031
$\alpha_{P(J)}$	0.8907	0.8862	0.8765	0.8656	0.8656	0.8641	0.8508	0.8386	0.8304	0.8304	0.8304
$\alpha_{EO(J)}$	0.9116	0.9072	0.8977	0.8871	0.8871	0.8856	0.8728	0.8608	0.8496	0.8494	0.8492

Fonte: Do autor (2023).

Figura 27 – Valores referentes da sucção até o ponto do pivô central inseridos no VSPM para gerar o arquivo para leitura em EPANET 2.2 do pivô central .

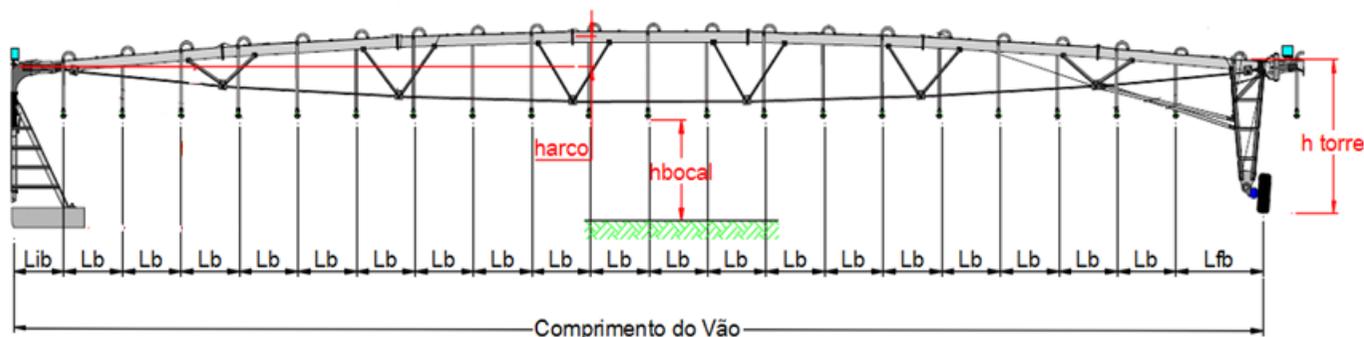


Fonte: Do autor (2023).

Figura 28 – Valores referentes dos vãos do pivô central e inserção dos valores das cotas no VSPM para gerar o arquivo para leitura em EPANET 2.2 do pivô central 1.

Rugosidade do Pendural	140
Rugosidade da Linha Lateral	135

Retornar ao Menu



Vão	Característica Pendural	Característica Arqueamento	Comp. do Vão (m)	Diâmetro LL (mm)	Nº de Saídas	Lib (m)	Lfb (m)	Lb (m)	h torre (m)	h arco (m)	h bocal (m)	L Pend (m)	D Pend (mm)	Raio de Giro Torre (m)	COTA Torre (nível solo)(m)
1	COM PENDURAL	COM ARCO	54.76	212.98	11	8.940	1.120	4.470	4	0.7	3	Variável	19.05	54.76	603.87
2	COM PENDURAL	COM ARCO	54.43	212.98	12	4.260	1.130	4.458	4	0.7	3	Variável	19.05	109.19	602.05
3	COM PENDURAL	COM ARCO	54.43	212.98	12	4.260	1.130	4.458	4	0.7	3	Variável	19.05	163.62	600.30
4	COM PENDURAL	COM ARCO	54.43	212.98	24	2.010	1.130	2.230	4	0.7	3	Variável	19.05	218.05	598.38
5	COM PENDURAL	COM ARCO	54.43	212.98	24	2.010	1.130	2.230	4	0.7	3	Variável	19.05	272.48	596.48
6	COM PENDURAL	COM ARCO	54.43	212.98	24	2.010	1.180	2.228	4	0.7	3	Variável	19.05	326.91	594.59
7	COM PENDURAL	COM ARCO	47.75	212.98	21	2.010	1.180	2.228	4	0.7	3	Variável	19.05	374.66	592.92
8	COM PENDURAL	COM ARCO	47.75	212.98	21	2.010	1.180	2.228	4	0.7	3	Variável	19.05	422.41	591.21
9	COM PENDURAL	COM ARCO	47.75	212.98	21	2.010	1.180	2.228	4	0.7	3	Variável	19.05	470.16	589.58
10	COM PENDURAL	COM ARCO	47.88	162.99	21	2.01	1.18	2.235	4	0.7	3	Variável	19.05	518.04	587.95
11	COM PENDURAL	COM ARCO	47.88	162.99	21	2.01	1.18	2.235	4	0.7	3	Variável	19.05	565.92	586.18
12	COM PENDURAL	COM ARCO	47.88	162.99	21	2.01	1.18	2.235	4	0.7	3	Variável	19.05	613.80	584.43
13	COM PENDURAL	COM ARCO	47.88	162.99	21	2.01	1.18	2.235	4	0.7	3	Variável	19.05	661.68	582.71
14	COM PENDURAL	COM ARCO	47.88	162.99	21	2.01	1.18	2.235	4	0.7	3	Variável	19.05	709.56	580.87
15	COM PENDURAL	COM ARCO	54.53	162.99	24	2.01	1.13	2.234	4	0.7	3	Variável	19.05	764.09	578.59
BAL	COM PENDURAL	SEM ARCO	21.03	135.99	9	1.33	1.8	2.238	0	0	3	htorre-hbocal	19.05	N.A.	N.A.
N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 16 - Valores de cotas das torres para cada angulação ( $\theta$ ) da posição 10° a 120° e os  $\alpha$  das estratégias de Monitoramento Total (T), Estratégia de monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) e M Monitoramento Otimizado das Extremidades(EO) para o pivô central 2.

Torres	Cota da torre em cada posição angular (J)											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
<b>T1</b>	789.79	789.53	789.14	788.63	788.00	787.41	786.73	785.98	785.23	784.49	783.77	784.12
<b>T2</b>	794.10	793.51	792.73	791.75	790.58	789.22	787.79	786.28	784.77	783.29	781.88	781.61
<b>T3</b>	798.04	797.32	796.23	794.67	792.77	790.60	788.39	786.07	783.79	781.61	779.65	779.07
<b>T4</b>	801.81	800.79	799.17	797.10	794.58	791.67	788.69	785.55	782.48	779.58	777.13	776.16
<b>T5</b>	804.90	803.44	801.44	798.93	795.54	791.86	788.18	784.39	780.64	777.19	774.13	772.62
<b>T6</b>	807.85	805.62	802.49	799.06	795.41	791.12	786.80	782.63	778.40	774.39	770.54	768.70
<b>T7</b>	809.50	806.72	802.53	798.06	794.47	789.34	784.74	780.58	775.96	772.03	767.82	764.95
<b>Velocidade de rotação</b>												
<b>Sem uso do inversor (<math>\alpha=1</math>)</b>	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
<b><math>\alpha_{T(J)}</math></b>	0.9038	0.8929	0.8757	0.8612	0.8473	0.8312	0.8160	0.8013	0.7881	0.7777	0.7703	0.7703
<b><math>\alpha_{P(J)}</math></b>	0.9225	0.9118	0.8950	0.8808	0.8673	0.8516	0.8367	0.8224	0.8096	0.7995	0.7923	0.7923
<b><math>\alpha_{EO(J)}</math></b>	0.9304	0.9198	0.9031	0.8851	0.8717	0.8508	0.8315	0.8158	0.7976	0.7975	0.7975	0.7975

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 17- Valores de cotas das torres para cada angulação ( $\theta$ ) da posição 130° a 250° e os  $\alpha$  das estratégias de Monitoramento Total (T), Estratégia de monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) e Monitoramento Otimizado das Extremidades(EO) para o pivô central 2.

Torres	Cota da torre em cada posição angular (J)												
	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
<b>T1</b>	782.55	783.90	781.91	781.87	781.94	782.11	782.33	782.64	783.04	783.53	784.09	784.68	785.36
<b>T2</b>	779.58	779.21	778.41	778.47	778.70	779.03	779.49	780.06	780.82	781.67	782.58	783.60	784.62
<b>T3</b>	776.77	776.22	775.40	775.62	776.06	776.65	777.18	777.91	778.91	780.02	780.94	782.04	783.42
<b>T4</b>	773.56	773.59	772.22	772.94	773.89	774.89	775.66	776.49	776.96	777.26	778.16	779.57	781.34
<b>T5</b>	770.06	770.68	769.86	771.32	773.03	774.19	774.91	775.53	774.91	774.80	775.38	777.11	779.22
<b>T6</b>	766.10	766.06	768.45	770.14	773.20	774.65	775.39	774.59	773.13	772.72	772.98	774.65	776.95
<b>T7</b>	762.87	763.27	766.83	770.11	773.69	774.91	774.56	773.30	771.61	770.77	770.16	772.15	773.62
<b>Velocidade de rotação</b>													
<b>Sem uso do inversor (<math>\alpha=1</math>)</b>	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
$\alpha_{T(J)}$	0.7660	0.7692	0.7660	0.7660	0.7660	0.7660	0.7660	0.7660	0.7663	0.7709	0.7748	0.7795	0.7852
$\alpha_{P(J)}$	0.7882	0.7913	0.7881	0.7881	0.7881	0.7881	0.7881	0.7882	0.7884	0.7929	0.7967	0.8012	0.8068
$\alpha_{EO(J)}$	0.7974	0.7975	0.7974	0.7973	0.7974	0.7973	0.7973	0.7974	0.7974	0.7975	0.7975	0.7976	0.7976

Fonte: Do autor (2023).

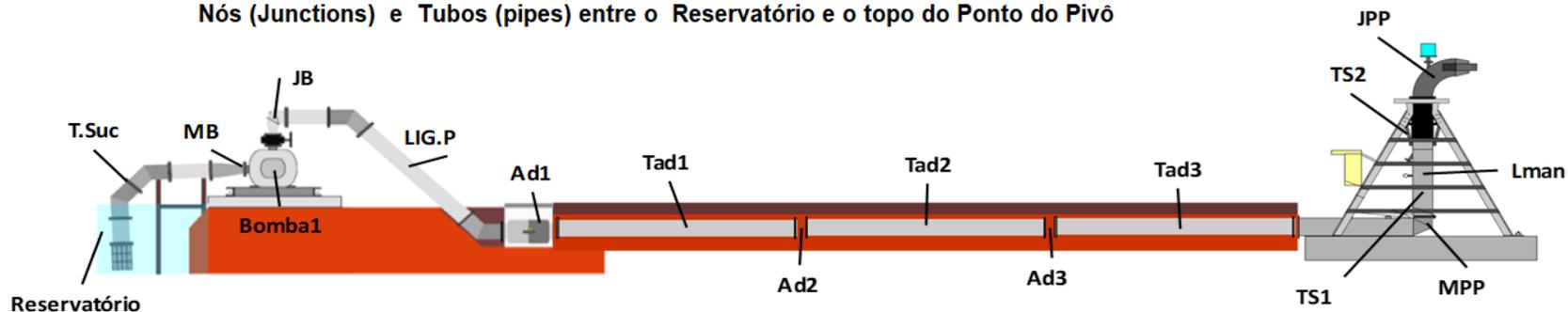
Tabela 18 - Valores de cotas das torres para cada angulação ( $\theta$ ) da posição 260° a 360° e os  $\alpha$  das Monitoramento Total (T), Estratégia de monitoramento com Posicionamento Otimizado (P) e Monitoramento Otimizado das Extremidades(EO) para o pivô central 2.

<b>Cota da torre em cada posição angular (J)</b>											
<b>Torres</b>	<b>260</b>	<b>270</b>	<b>280</b>	<b>290</b>	<b>300</b>	<b>310</b>	<b>320</b>	<b>330</b>	<b>340</b>	<b>350</b>	<b>360</b>
<b>T1</b>	786.00	786.66	787.20	787.90	788.45	788.97	789.19	789.66	789.43	790.42	789.92
<b>T2</b>	785.65	786.84	788.03	789.09	790.40	791.58	792.66	793.47	793.91	794.26	794.35
<b>T3</b>	785.02	786.75	788.43	790.16	791.95	793.68	795.59	796.72	797.73	798.28	798.39
<b>T4</b>	783.44	785.69	787.83	790.22	792.64	794.99	797.29	799.42	801.04	801.95	802.07
<b>T5</b>	781.55	783.94	786.46	789.40	792.49	795.67	798.66	801.52	803.99	805.20	805.40
<b>T6</b>	779.04	781.60	784.31	787.65	791.50	795.46	799.50	804.01	806.10	808.08	808.59
<b>T7</b>	776.09	778.73	781.71	785.51	789.87	794.63	799.36	804.39	807.48	809.95	810.69
<b>Velocidade de rotação</b>											
<b>Sem uso do inversor (<math>\alpha=1</math>)</b>	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
<b><math>\alpha_{T(J)}</math></b>	0.7924	0.8013	0.8102	0.8211	0.8334	0.8476	0.8640	0.8831	0.8961	0.9058	0.9088
<b><math>\alpha_{P(J)}</math></b>	0.8138	0.8224	0.8311	0.8417	0.8537	0.8675	0.8836	0.9022	0.9150	0.9245	0.9274
<b><math>\alpha_{EO(J)}</math></b>	0.7976	0.8069	0.8194	0.8353	0.8531	0.8725	0.8912	0.9103	0.9229	0.9323	0.9352

Fonte: Do autor (2023).

Figura 29 – Valores referentes da sucção até o ponto do pivô central inseridos no VSPM para gerar o arquivo para leitura em EPANET 2.2 do pivô central 2.

Nós (Junctions) e Tubos (pipes) entre o Reservatório e o topo do Ponto do Pivô



Nó de Início		PIPE				Nó de Fim	
ID	cota m	ID	Comp m	Diam mm	Rug	ID	cota m
Reservatorio	748.56	T.Suc	5	250	130	MB	750.56
MB	750.56	BOMBA	BOMBA	BOMBA	BOMBA	JB	750.56
JB	750.56	LIG.P	352	204.2	130	Ad1	759.31
Ad1	759.31	Tad1	150	204.2	130	Ad2	768.06
Ad2	768.06	Tad2	150	204.2	130	Ad3	776.81
Ad3	776.81	Tad3	210	204.2	130	MPP	785.56
MPP	785.56	TS1	1.875	162.27	130	Lman	787.43
Lman	787.43	TS2	1.875	162.27	130	JPP	789.31

Retornar ao Menu

Limpar

Inserir curva da Bomba

Altura Geométrica de Sucção (HGS)	2	m
Desnível entre Bomba e Centro do Pivô	35	m
Altura da Torre Central	3.75	m
Altura do Manômetro em relação ao solo	1.87	m

Fonte: Do autor (2023)

