

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**“USO EFICIENTE DEL AGUA Y ENERGÍA EN EL SISTEMA DE  
RIEGO PRESURIZADO CASO: FUNDO AGRÍCOLA - UNALM”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERA AGRÍCOLA**

**CLAUDIA ESTEFANY MOLINA RAYMUNDO**

**LIMA-PERÚ**

**2021**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA**

**“USO EFICIENTE DEL AGUA Y ENERGIA EN EL SISTEMA DE  
RIEGO PRESURIZADO CASO: FUNDO AGRÍCOLA -UNALM”**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE:

**INGENIERA AGRÍCOLA**

Presentado por:

**BACH. CLAUDIA ESTEFANY MOLINA RAYMUNDO**

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Mg. Sc. LUIS RAMÓN RÁZURI RAMÍREZ  
Presidente

Dr. DAVID RICARDO ASCENCIOS TEMPLO  
Asesor

Mg. Sc. JAVIER ANTONIO GOICOCHEA RÍOS  
Miembro

Ing. JOSÉ BERNARDINO ARAPA QUISPE  
Miembro

Mg. Sc. KAREM BELEN MEZA CAPCHA  
Co-Asesor

LIMA – PERÚ

2021

# DEDICATORIA

A mi madre Vilma por siempre creer en mí, ser mi confidente y mi maestra en la vida, a mi padre Jorge por haberme brindado el valor de la disciplina, constancia y el valor de las cosas.

A mi tía Elsa, mi segunda madre por comprenderme, apoyarme en los momentos más difíciles y sobre todo por ser mi ada madrina.

A mi hermana Johana, porque es el regalo más preciado que me dio Dios y siempre me alienta a hacer nuevas cosas.

A mis abuelos Juana y Florentino por haberme brindado su amor y valores en mi infancia.

# AGRADECIMIENTOS

A mi asesor de tesis, Dr. David Ricardo Ascencios Templo, por las enseñanzas y tiempo brindado durante la elaboración de la tesis.

A mi familia Raymundo por siempre apoyarme en cada paso de mi vida y mis tías y tíos que fueron los ejemplos que seguí desde niña.

A mi familia Molina, abuelos Ricardo y Julia, tíos y primos.

A mi mejor amiga Fanny por siempre brindarme su ayuda y ánimo en la tesis y estar siempre ahí cuando la necesito.

A mis amigos de la universidad Huacho, Carlos, Kelly, Samantha, Lesly, Yuner, Stephany y Yamile sin ustedes la universidad no hubiera sido la misma, gracias por los momentos divertidos en el ferial y las largas horas de estudio juntos.

Y a mis compañeros de promoción Pistones 2014-II, por los momentos divertidos en cada gymkana.

# Índice general

<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS . . . . .	2
1.1.1. OBJETIVO GENERAL . . . . .	2
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . . .	2
<b>II. REVISIÓN LITERARIA</b>	<b>3</b>
2.1. Uso eficiente del agua y energía en el sistema hidráulico de riego presurizado	3
2.2. Sistema de riego presurizado . . . . .	3
2.3. Componentes de un sistema de riego . . . . .	4
2.3.1. Fuente de abastecimiento de agua . . . . .	4
2.3.2. Cabezal de riego . . . . .	4
2.3.3. Red de distribución . . . . .	6
2.3.4. Emisores . . . . .	7
2.4. Necesidades hídricas de los cultivos . . . . .	9
2.4.1. Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) . . . . .	9
2.4.2. Coeficiente de cultivo (K <sub>c</sub> ) . . . . .	10
2.4.3. Evapotranspiración del cultivo (ET <sub>c</sub> ) . . . . .	10
2.5. Uso Eficiente del recurso hídrico . . . . .	10
2.5.1. Coeficiente de uniformidad (CU) . . . . .	10
2.6. Pérdidas de carga por fricción y singularidades . . . . .	11
2.7. Selección de tuberías . . . . .	11
2.7.1. Velocidad máxima permisible . . . . .	11
2.7.2. Selección técnica económica de tuberías . . . . .	12
2.8. Sistema de bombeo . . . . .	13

2.8.1.	Eficiencia de la bomba . . . . .	14
2.8.2.	Curvas características de la bomba . . . . .	16
2.8.3.	Configuraciones de una bomba . . . . .	17
2.8.4.	Curva del sistema . . . . .	19
2.8.5.	Ecuaciones matemáticas de las curvas características . . . . .	20
2.8.6.	Leyes de afinidad . . . . .	22
2.9.	Región de operación admitida y permitida . . . . .	23
2.9.1.	Región de operación admitida (AOR) . . . . .	23
2.9.2.	Región de operación permitida (POR) . . . . .	24
2.10.	Eficiencia energética . . . . .	25
2.10.1.	Eficiencia energética en sistemas de riego y medidas para el ahorro . . . . .	26
2.10.2.	Consumo energético en los sistemas de bombeo . . . . .	26
2.11.	Eficiencia energética en motores eléctricos . . . . .	27
2.11.1.	Descripción y funcionamiento . . . . .	27
2.11.2.	Potencia y eficiencia del motor . . . . .	27
2.11.3.	Consumo energético . . . . .	28
2.11.4.	Normativa sobre eficiencia energética en motores eléctricos . . . . .	28
2.12.	Controles de caudal . . . . .	28
2.12.1.	Modo de control por estrangulación . . . . .	29
2.12.2.	Modo de control por VDF . . . . .	29
2.13.	Eficiencia energética por medio de variadores de frecuencia . . . . .	30
2.13.1.	Descripción y funcionamiento . . . . .	30
2.13.2.	Ahorro energético por el uso de variadores de frecuencia . . . . .	32
2.13.3.	Modos de funcionamiento . . . . .	32
2.13.4.	Modos de control . . . . .	32
2.14.	Escenarios que se presentan en el sistema de riego por turnos . . . . .	35
2.14.1.	Caudal constante/altura dinámica total variable . . . . .	35
2.14.2.	Caudal variable/altura dinámica total constante . . . . .	36
2.14.3.	Caudal variable/altura dinámica total variable . . . . .	36
2.15.	Gases de efecto invernadero . . . . .	37

2.16. Emisiones de $CO_2$ . . . . .	38
2.17. Contribución Nacional del Perú para mitigar los gases de efecto invernadero	38
2.18. El cultivo de la palta . . . . .	40
2.18.1. Generalidades del cultivo . . . . .	40
2.18.2. Generalidades del cultivo . . . . .	40
2.18.3. Manejo agronómico . . . . .	40
2.18.4. Producción, rendimiento y precio . . . . .	41
<b>III.METODOLOGÍA</b>	<b>43</b>
3.1. Ubicación y extensión . . . . .	43
3.1.1. Ubicación política . . . . .	43
3.1.2. Ubicación geográfica . . . . .	43
3.2. Materiales . . . . .	44
3.3. Metodología . . . . .	45
3.3.1. Datos básicos . . . . .	46
3.3.2. Cálculo del balance hídrico . . . . .	47
3.3.3. Diseño agronómico . . . . .	47
3.3.4. Diseño hidráulico . . . . .	48
3.3.5. Escenarios que se presentan en el sistema de riego . . . . .	51
3.3.6. Selección de motores y bombas . . . . .	52
3.3.7. Desarrollo de las curvas características para cada escenario . . . . .	53
3.3.8. Costos energéticos para el modo de control por estrangulación . . . . .	54
3.3.9. Costos energéticos para modo del control con el VDF . . . . .	56
3.3.10. Determinación de la región de operación admitida y permitida . . . . .	60
3.3.11. Comparación de costos energéticos sin y con el uso de VDF . . . . .	61
3.3.12. Ahorros energéticos con el uso del VDF . . . . .	62
3.3.13. Emisiones de $CO_2$ sin el uso del VDF . . . . .	63
3.3.14. Emisiones de $CO_2$ con el uso del VDF . . . . .	63
3.3.15. Comparación del $CO_2$ sin y con el uso del VDF . . . . .	63
3.3.16. Reducción de emisiones de $CO_2$ por el uso del VDF . . . . .	63

<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>	<b>65</b>
4.1. Cálculo del balance hídrico . . . . .	65
4.1.1. Oferta del agua . . . . .	66
4.1.2. Demanda del agua . . . . .	66
4.1.3. Balance hídrico . . . . .	68
4.2. Diseño del reservorio . . . . .	69
4.3. Diseño agronómico . . . . .	70
4.4. Diseño hidráulico . . . . .	72
4.4.1. Caudales constantes y alturas dinámicas totales variables por turno de riego . . . . .	72
4.4.2. Caudales variables y alturas dinámicas totales constantes por turno de riego . . . . .	82
4.4.3. Caudales y alturas dinámicas totales variables por turno de riego . .	86
4.4.4. Caudales y alturas dinámicas totales constantes por turno de riego .	90
4.5. Diseño del cabezal de riego . . . . .	94
4.5.1. Filtro de gravas . . . . .	95
4.5.2. Filtro de mallas . . . . .	95
4.5.3. Aparatos de control y medición . . . . .	95
4.6. Escenarios que se presentan en el sistema de riego por turnos . . . . .	95
4.7. Selección de bomba y motores . . . . .	96
4.8. Desarrollo de las curvas características en formato Excel para cada escenario	100
4.9. Curvas características y los puntos de operación . . . . .	109
4.10. Costos energéticos para el modo de control por estrangulación . . . . .	111
4.10.1. Primer escenario (Caudal contantes/altura dinámica total variable) .	111
4.10.2. Segundo escenario (Altura dinámica total contante/caudal variable)	116
4.10.3. Tercer escenario (Caudal variable/altura dinámica total variable) . .	119
4.10.4. Cuarto escenario (Caudal contante/altura dinámica total constante) .	121
4.10.5. Quinto escenario (Bombas en paralelo) . . . . .	123
4.11. Costos energéticos para modos de control para el VDF . . . . .	128
4.11.1. Costos energéticos para el modo de control de bucle abierto . . . . .	128

4.11.2. Costos energéticos para el modo de control de bucle cerrado . . . . .	144
4.12. Determinación de la región de operación permitida y admitida . . . . .	178
4.13. Comparaciones de costos energéticos sin y con el uso del VDF . . . . .	185
4.14. Ahorros energéticos con el uso del VDF . . . . .	187
4.14.1. Bucle abierto . . . . .	187
4.14.2. Bucle cerrado . . . . .	188
4.15. Emisiones de CO <sub>2</sub> sin VDF . . . . .	190
4.16. Emisiones de CO <sub>2</sub> con VDF . . . . .	192
4.16.1. Bucle abierto . . . . .	192
4.16.2. Bucle cerrado . . . . .	193
4.17. Comparación del CO <sub>2</sub> sin y con el uso del VDF . . . . .	194
4.18. Reducción de emisiones de CO <sub>2</sub> con el uso del VDF . . . . .	196
4.18.1. Bucle abierto . . . . .	196
4.18.2. Bucle cerrado . . . . .	196
<b>V. CONCLUSIONES</b>	<b>200</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES</b>	<b>202</b>
<b>VII. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>203</b>
<b>VIII. ANEXOS</b>	<b>208</b>

# Índice de tablas

2.1. Tipo de filtro respecto al origen del agua . . . . .	5
2.2. Características técnicas del Filtro Mini Sigma . . . . .	5
2.3. Clasificación de los emisores respecto a la sensibilidad de obturación . .	9
2.4. Practica ANSI/HI 9.6.3 -2012 . . . . .	24
2.5. Factores de emisión de kgCO <sub>2</sub> . . . . .	38
2.6. Opciones de mitigación consideradas en el sector de Energía . . . . .	39
2.7. Producción mundial de paltas . . . . .	41
2.8. Superficie cosechada, producción y rendimiento de la palta . . . . .	42
3.1. Climatología observada de la estación Alexander Von Humboldt 1994- 2010 . . . . .	46
4.1. Climatología simulada de la radiación solar y Eto 1994-2010 . . . . .	65
4.2. Valores de Eto mensual . . . . .	66
4.3. Oferta de agua para el Fundo agrícola . . . . .	66
4.4. Demanda de agua para el Fundo agrícola . . . . .	67
4.5. Balance hídrico mensual para el Fundo agrícola . . . . .	68
4.6. Balance hídrico semanal para el Fundo agrícola . . . . .	69
4.7. Forma del reservorio . . . . .	70
4.8. Parámetros de diseño agronómico . . . . .	71
4.9. Parámetros del diseño hidráulico . . . . .	72
4.10. Parámetros de operación del segundo diseño . . . . .	74
4.11. Presión y caudales en laterales del primer diseño . . . . .	75
4.12. Presión y caudales en la entrada de las subunidades del primer diseño .	75
4.13. Pérdida de carga por el arco de riego del primer diseño . . . . .	76

4.14. Pérdida de carga en la carga principal para los tres turnos del primer diseño . . . . .	77
4.15. Caudal y presión para las subunidades del primer diseño . . . . .	78
4.16. Cálculo de altura dinámica total del primer diseño . . . . .	78
4.17. Parámetros de operación del segundo diseño . . . . .	84
4.18. Caudal y presión para las subunidades del segundo diseño . . . . .	85
4.19. Cálculo de altura dinámica total del segundo diseño . . . . .	85
4.20. Parámetros de operación del tercer diseño . . . . .	88
4.21. Caudal y presión para las subunidades del tercer diseño . . . . .	89
4.22. Cálculo de altura dinámica total del tercer diseño . . . . .	89
4.23. Parámetros de operación del cuarto diseño . . . . .	92
4.24. Caudal y presión para las subunidades del cuarto diseño . . . . .	93
4.25. Cálculo de altura dinámica total del cuarto diseño . . . . .	93
4.26. Escenarios en el Fundo agrícola . . . . .	96
4.27. Puntos elegidos para la selección de la bomba . . . . .	96
4.28. Puntos de Q y ADT de la ficha técnica del primer escenario . . . . .	100
4.29. Puntos de Q y n de la ficha técnica del primer escenario . . . . .	101
4.30. Puntos de Q y P de la ficha técnica del primer escenario . . . . .	102
4.31. Puntos de Q y P de la ficha técnica del primer escenario . . . . .	103
4.32. Ecuaciones de las curvas características para los cinco escenarios . . . . .	105
4.33. Valores de ADT, n, P y NPSHr para los cinco escenarios . . . . .	106
4.34. Requerimiento de Q, ADT y áreas del primer escenario . . . . .	111
4.35. Horas de bombeo mensual por turno del primer escenario . . . . .	112
4.36. Valores de Q y H para la curva del sistema del primer escenario . . . . .	114
4.37. Porcentaje de áreas y requerimientos de Q y ADT del segundo escenario . . . . .	116
4.38. Puntos de operación en la curva de 50 Hz del segundo escenario . . . . .	116
4.39. Valores de Q y H para la curva del sistema del segundo escenario . . . . .	117
4.40. Costos energéticos por estrangulación del segundo escenario . . . . .	118
4.41. Porcentaje de áreas y requerimientos de Q y ADT para el tercer escenario . . . . .	119
4.42. Puntos de operación en la curva de 50 Hz del tercer escenario . . . . .	119

4.43. Valores de Q y H para la curva del sistema del tercer escenario . . . . .	120
4.44. Costos energéticos por estrangulación del tercer escenario . . . . .	121
4.45. Porcentaje de áreas y requerimientos de Q y ADT para el cuarto escenario	122
4.46. Puntos de operación en la curva de 50 Hz del cuarto escenario . . . . .	122
4.47. Valores de Q y H para la curva del sistema del cuarto escenario . . . . .	122
4.48. Costos energéticos por estrangulación del cuarto escenario . . . . .	123
4.49. Porcentaje de áreas y requerimientos de Q y ADT para el quinto escenario	124
4.50. Puntos de operación en la curva de 50 Hz del quinto escenario . . . . .	124
4.51. Valores de Q y H para la curva del sistema del quinto escenario . . . . .	125
4.52. Costos energéticos por estrangulación del quinto escenario . . . . .	126
4.53. Eficiencia energética para los cinco escenarios por estrangulación . . . .	127
4.54. Valores de Q, ADT, P y $\eta$ para la velocidad de 50 Hz del primer escenario	129
4.55. Velocidades para los puntos de operación del primer escenario . . . . .	129
4.56. Valores de Q, ADT, P y $\eta$ para las velocidades de 60, 49, 45.7 y 43.6 Hz del primer escenario . . . . .	130
4.57. Valores de Q, ADT, P y n para la velocidad de 50 Hz del segundo escenario	135
4.58. Velocidades para los puntos de operación del segundo escenario . . . . .	135
4.59. Valores de Q, ADT, P y n para las velocidades de 60, 47.4, 42.5 y 41.9 Hz del segundo escenario . . . . .	136
4.60. Costos energéticos con VDF/bucle abierto del segundo escenario . . . . .	139
4.61. Valores de Q, ADT, P y n para la velocidad de 50 Hz del segundo escenario	140
4.62. Velocidades para los puntos de operación del tercer escenario . . . . .	140
4.63. Valores de Q, ADT, P y n para las velocidades de 60, 46.2, 44.4 y 38.6 Hz del tercer escenario . . . . .	141
4.64. Costos energéticos por estrangulación del tercer escenario . . . . .	143
4.65. Eficiencia energética para los tres primeros escenarios con VDF/bucle abierto . . . . .	144
4.66. Puntos de la recta para presión constante del segundo escenario . . . . .	145
4.67. Puntos de operación en la recta de presión constante del segundo escenario	145

4.68. Valores de Q y H para la curva del sistema para presión constante del segundo escenario . . . . .	146
4.69. Valores de Q, ADT, P y n para las velocidades de 45.7 y 44.8 Hz del segundo escenario . . . . .	147
4.70. Costos energéticos para modo de regulación por VDF/bucle cerrado de presión constante del segundo escenario . . . . .	150
4.71. Puntos de la recta para presión diferencial lineal del segundo escenario	150
4.72. Puntos de operación en la recta de presión diferencial lineal del segundo escenario . . . . .	151
4.73. Valores de Q y H para la curva del sistema para presión diferencial lineal del segundo escenario . . . . .	151
4.74. Valores de Q, ADT, P y $\eta$ para las velocidades de 43.6 y 41.8 Hz del segundo escenario . . . . .	152
4.75. Costos energéticos para modo de regulación por VDF/bucle cerrado de presión diferencial lineal del segundo escenario . . . . .	155
4.76. Ecuaciones para los puntos de la presión diferencial cuadrática del segundo escenario . . . . .	155
4.77. Puntos en la recta para presión diferencial cuadrática del segundo escenario . . . . .	156
4.78. Puntos de operación de la recta de presión diferencial cuadrática del segundo escenario . . . . .	156
4.79. Valores de Q y H para la curva del sistema para presión diferencial cuadrática del segundo escenario . . . . .	157
4.80. Valores de Q, ADT, P y n para las velocidades de 43.5 y 41.8 Hz del segundo escenario . . . . .	158
4.81. Costos energéticos para modo de regulación por VDF/bucle cerrado de presión diferencial cuadrática del segundo escenario . . . . .	160
4.82. Puntos de la recta para presión constante del tercer escenario . . . . .	160
4.83. Puntos de operación en la recta de presión constante del tercer escenario	161
4.84. Valores de Q y H para la curva del sistema para presión constante del tercer escenario . . . . .	162

4.85. Valores de Q, ADT, P y $\eta$ para las velocidades de 48.5 y 48.3 Hz del tercer escenario . . . . .	163
4.86. Costos energéticos para modo de regulación por VDF/bucle cerrado de presión constante del tercer escenario . . . . .	166
4.87. Puntos de la recta para presión diferencial lineal del tercer escenario . . . . .	166
4.88. Puntos de operación en la recta de presión diferencial lineal del tercer escenario . . . . .	167
4.89. Valores de Q y H para la curva del sistema para presión diferencial lineal del tercer escenario . . . . .	167
4.90. Valores de Q, ADT, P y $\eta$ para las velocidades de 43.6 y 41.8 Hz del tercer escenario . . . . .	168
4.91. Costos energéticos para modo de regulación por VDF/bucle cerrado de presión diferencial lineal del tercer escenario . . . . .	171
4.92. Ecuaciones para los puntos de la presión diferencial cuadrática del tercer escenario . . . . .	171
4.93. Puntos de la recta para presión diferencial cuadrática del tercer escenario	172
4.94. Puntos de operación para la recta de presión diferencial cuadrática del tercer escenario . . . . .	172
4.95. Valores de Q y H para la curva del sistema para presión diferencial cuadrática del tercer escenario . . . . .	173
4.96. Valores de Q, ADT, P y n para las velocidades de 44.7 y 44 Hz del tercer escenario . . . . .	174
4.97. Costos energéticos para modo de regulación por VDF/bucle cerrado de presión diferencial cuadrática del tercer escenario . . . . .	177
4.98. Eficiencia energética del segundo escenario con VDF/bucle cerrado . . . . .	177
4.99. Eficiencia energética del tercer escenario con VDF/bucle cerrado . . . . .	178
4.100. Valores límites de la AOR del primer escenario . . . . .	179
4.101. Valores límites de la POR del primer escenario . . . . .	179
4.102. Valores de a, b y Q de máxima eficiencia del primer escenario . . . . .	180
4.103. Valores límites de la POR para las tres velocidades del primer escenario	180

4.104. Valores límites de la AOR sin el uso del VDF para el segundo, tercer y cuarto escenario . . . . .	182
4.105. Valores límites de la POR sin el uso del VDF para el segundo, tercer y cuarto escenario . . . . .	182
4.106. Valores límites de la POR con el uso del VDF para el segundo y tercer escenario . . . . .	182
4.107. Costos energéticos sin y con VDF para todos los escenarios . . . . .	185
4.108. Ahorros en costos energéticos con VDF/bucle abierto . . . . .	187
4.109. Tiempo de recuperación para los tres primeros escenarios . . . . .	188
4.110. Ahorros energéticos con VDF/bucle cerrado del segundo escenario . . . . .	188
4.111. Ahorros energéticos con VDF/bucle cerrado del tercer escenario . . . . .	189
4.112. Ahorros energéticos con VDF/bucle cerrado . . . . .	189
4.113. Comparación de ahorros energéticos con VDF/bucle abierto y cerrado . . . . .	189
4.114. Energía anual sin VDF para los cinco escenarios . . . . .	191
4.115. Emisiones de CO <sub>2</sub> sin VDF para los cinco escenarios . . . . .	191
4.116. Energía anual con VDF/bucle abierto para el primer, segundo y tercer escenario . . . . .	192
4.117. Emisiones de CO <sub>2</sub> con VDF/bucle abierto para el primer, segundo y tercer escenario . . . . .	192
4.118. Energía anual con VDF/bucle cerrado para el segundo escenario . . . . .	193
4.119. Emisiones de CO <sub>2</sub> con VDF/bucle abierto para el segundo escenario . . . . .	193
4.120. Energía anual con VDF/bucle cerrado para el tercer escenario . . . . .	194
4.121. Emisiones de CO <sub>2</sub> con VDF/bucle abierto del tercer escenario . . . . .	194
4.122. Emisiones de CO <sub>2</sub> sin y con VDF para todos los escenarios . . . . .	195
4.123. Reducción de emisiones de CO <sub>2</sub> con VDF/bucle abierto . . . . .	196
4.124. Reducción de emisión de CO <sub>2</sub> con VDF/bucle cerrado del segundo escenario . . . . .	197
4.125. Reducción de emisión de CO <sub>2</sub> con VDF/bucle cerrado del tercer escenario . . . . .	197
4.126. Reducciones de emisiones de CO <sub>2</sub> con bucle cerrado . . . . .	198

<b>4.127 Comparación de reducciones de emisiones de CO<sub>2</sub> con VDF/bucle abierto y cerrado . . . . .</b>	<b>198</b>
--	------------

# Índice de figuras

2.1. Esquema de componentes de la red de distribución . . . . .	7
2.2. Selección técnica económica de tuberías . . . . .	13
2.3. Esquema de potencias en una bomba . . . . .	14
2.4. Curvas características de una bomba centrífuga vertical modelo CR 95- 1-1 AFAE-HQQE . . . . .	17
2.5. Acoplamiento de bomba en serie . . . . .	18
2.6. Acoplamiento de bomba en paralelo . . . . .	18
2.7. Acoplamiento en serie y en paralelo de dos bombas iguales . . . . .	19
2.8. Componentes de la curva del sistema . . . . .	20
2.9. Ensayo completo de una bomba centrífuga a diferentes N° RPM . . . . .	23
2.10. Región de operación permitida (POR) y región de operación admitida (AOR) . . . . .	25
2.11. Producción de energía eléctrica en el Perú para Mayo del 2021 . . . . .	26
2.12. Gráfica de eficiencia VS salida en kW . . . . .	28
2.13. Regulación del punto de funcionamiento por una válvula . . . . .	29
2.14. Regulación por variación del régimen de giro de la bomba . . . . .	30
2.15. Forma de onda generada por modulación de ancho de pulso . . . . .	31
2.16. Diagrama en bloques de un variador . . . . .	31
2.17. Diagrama de funcionamiento a curva constante . . . . .	33
2.18. Diagrama de funcionamiento a presión constante . . . . .	33
2.19. Diagrama de variación de velocidad y curva de potencia con variación de velocidad . . . . .	34
2.20. Diagrama de funcionamiento a presión diferencial proporcional . . . . .	34

2.21. Diagrama de funcionamiento a presión diferencial proporcional, curva parabólica . . . . .	35
2.22. Escenario de turnos de Q variable y ADT constante . . . . .	36
2.23. Escenario de turnos de Q constante y ADT variable . . . . .	36
2.24. Escenario de turnos de Q y ADT variable . . . . .	37
3.1. Ubicación geográfica del Fundo agrícola . . . . .	44
3.2. Diagrama de flujo de la metodología . . . . .	45
4.1. Balance hídrico mensual del Fundo agrícola . . . . .	68
4.2. Balance hídrico semanal del Fundo agrícola . . . . .	69
4.3. Esquema de la distribución de los turnos de riego en el Fundo agrícola del primer diseño . . . . .	73
4.4. Diseño del arco de riego para el I, II y III turno del primer diseño . . . . .	76
4.5. Diagrama de presiones - I Turno del primer diseño . . . . .	79
4.6. Diagrama de presiones - II Turno del primer diseño . . . . .	80
4.7. Diagrama de presiones - III Turno del primer diseño . . . . .	81
4.8. Gráfica de requerimiento de Q y ADT del primer diseño . . . . .	82
4.9. Esquema de la distribución de los turnos de riego en el Fundo agrícola del segundo diseño . . . . .	83
4.10. Gráfica de requerimiento de Q y ADT del segundo diseño . . . . .	86
4.11. Esquema de la distribución de los turnos de riego en el Fundo agrícola del tercer diseño . . . . .	87
4.12. Gráfica de requerimiento de Q y ADT del tercer diseño . . . . .	90
4.13. Esquema de la distribución de los turnos de riego en el Fundo agrícola del cuarto diseño . . . . .	91
4.14. Gráfica de requerimiento de Q y ADT del cuarto diseño . . . . .	94
4.15. Diagrama de presiones - I Turno del primer diseño . . . . .	97
4.16. Diagrama de presiones - I Turno del primer diseño . . . . .	98
4.17. Diagrama de presiones - I Turno del primer diseño . . . . .	99
4.18. Curva de ADT del primer escenario . . . . .	101

4.19. Curva de eficiencia del primer escenario . . . . .	102
4.20. Curva de potencia del primer escenario . . . . .	103
4.21. Curva de NPSHr del primer escenario . . . . .	105
4.22. Comparación de curvas de ADT, eficiencia y potencia de la 1 bomba y 2 bombas en paralelo . . . . .	107
4.23. Curvas características: a) Primer, b) Segundo, c) Tercer, d) Cuarto, e) Quinto escenario . . . . .	108
4.24. Curvas características y puntos operativos: a) Primer, b) Segundo, c) Tercer, d) Cuarto, e) Quinto escenario . . . . .	110
4.25. Curvas del sistema para los puntos de operación del primer escenario .	114
4.26. Curvas del sistema para los puntos de operación del segundo escenario	118
4.27. Curvas del sistema para los puntos de operación del tercer escenario . .	121
4.28. Curvas del sistema para los puntos de operación del cuarto escenario .	123
4.29. Curvas del sistema para los puntos de operación del quinto escenario .	126
4.30. Familia de curvas de ADT, potencia y eficiencia para las velocidades de 60, 49, 45.7, 43.6 Hz del primer escenario . . . . .	132
4.31. Datos eléctricos del VDF del primer escenario . . . . .	133
4.32. Familia de curvas de ADT, eficiencia y potencia para las velocidades de 60, 48.1, 46.3, 41 Hz del segundo escenario . . . . .	138
4.33. Familia de curvas de eficiencia para las velocidades de 60, 46.2,44 y 38.6 Hz del tercer escenario . . . . .	142
4.34. Gráfica para el modo de control de presión constante del segundo escenario . . . . .	147
4.35. Familia de curvas de eficiencia para las velocidades de 60, 50, 45.7 y 44.8 Hz del segundo escenario . . . . .	149
4.36. Gráfica para presión diferencial lineal del segundo escenario . . . . .	152
4.37. Familia de curvas de ADT, potencia y eficiencia para las velocidades de 60,50,43.6 y 41.8 Hz del segundo escenario . . . . .	154
4.38. Gráfica para presión diferencial cuadrática con las curvas de sistema del segundo escenario . . . . .	158

4.39. Familia de curvas de eficiencia para las velocidades 60, 50, 43.5 y 41.8 Hz del segundo escenario . . . . .	159
4.40. Gráfica para el modo de control de presión constante del tercer escenario	163
4.41. Familia de curvas ADT, potencia, eficiencia para las velocidades de 60, 50, 48.5 y 48.3 Hz del tercer escenario . . . . .	165
4.42. Gráfica para presión diferencial lineal del tercer escenario . . . . .	168
4.43. Familia de curvas de ADT, eficiencia y potencia para las velocidades de 60, 50, 46.8 y 46.2 Hz del tercer escenario . . . . .	170
4.44. Gráfica para presión diferencial cuadrática con las curvas del sistema del tercer escenario . . . . .	174
4.45. Familia de curvas de ADT, eficiencia y potencia para las velocidades de 60,50, 44.7 y 44 Hz del tercer escenario . . . . .	176
4.46. AOR y POR sin el uso del VDF para a) Primer, b) Segundo, c) Tercer, d) Cuarto, e) Quinto escenario . . . . .	183
4.47. POR con el uso del VDF para el a) Primer, b) Segundo, c) Tercer escenario	184
4.48. Costos energéticos sin y con el VDF . . . . .	186
4.49. Ahorros en costos energéticos en bucle abierto y cerrado . . . . .	190
4.50. Emisiones de CO <sub>2</sub> sin y con el VDF . . . . .	195
4.51. Reducciones de CO <sub>2</sub> con VDF /bucle abierto y cerrado . . . . .	198

# Índice de anexos

ANEXO 1: Análisis de agua rutina para el canal de riego UNALM . . . . .	209
ANEXO 2: Ficha técnica del gotero AZUD Premier PC AS 20 . . . . .	210
ANEXO 3: Diseño hidráulico . . . . .	211
ANEXO 4: Ficha técnica del filtro de gravas y malla . . . . .	232
ANEXO 6: Ficha técnica del variador de frecuencia CUE . . . . .	234
ANEXO 7: Costos de bomba CR de Grundfos . . . . .	236
ANEXO 8: Costos del variador de frecuencia CUE de Grundfos . . . . .	237
ANEXO 9: Eficiencia energética, costos energéticos y emisiones de CO <sub>2</sub> - Caso Actual del Fundo agrícola . . . . .	238

# RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo diseñar y evaluar los escenarios para el uso eficiente del agua y energía en un sistema de riego presurizado, caso: Fundo agrícola en la Universidad Nacional Agraria La Molina, se diseñó diferentes sistemas de riego, se evaluó la eficiencia de riego, energía y se estimó los costos energéticos y emisiones de  $CO_2$ , para compararlos posteriormente. Se realizó el balance hídrico, el diseño agronómico, coeficiente de uniformidad, y eficiencia de riego, se tomó en cuenta la sensibilidad del cultivo a las sales y la conductividad eléctrica del agua. Se planteó diferentes escenarios para una misma área y cultivo: caudal constante y altura dinámica total variable, caudal variable y altura dinámica total constante, caudal y altura dinámica total variable, caudal y altura dinámica total constante, y bombas en paralelo. Se calcularon los costos energéticos sin y con el variador de frecuencia. Se determinó la región de operación admitida y permitida y se calculó las emisiones de  $CO_2$  sin y con el variador de frecuencia para los diferentes escenarios. Se obtuvo como resultados que los altos valores de eficiencia energética no garantiza menores costos de energía, sin embargo el uso de variadores de frecuencia permitieron el ahorro de energía y reducción de emisiones para el primer escenario de 17.45 % ,segundo escenario de 29 % y tercer escenario de 29.30 % por año con respecto al no uso del variador de frecuencia, los variadores permiten la reducción de  $CO_2$  de todos los escenarios planteados y la recuperación de la inversión varía entre 5 a 8 años.

**Palabras Clave:** Agua, Energía, Uso eficiente, Variadores de frecuencia, Costos energéticos, Emisiones de  $CO_2$ .

# ABSTRACT

The objective of this research was to design and evaluate the scenarios for the efficient use of water and energy in a pressurized irrigation system case: Fundo agrícola at the Universidad Agraria La Molina, different irrigation systems were designed, the efficiency of irrigation, energy and energy costs and  $CO_2$  emissions were estimated, to be compared later. The water balance, agronomic design, uniformity coefficient, and irrigation efficiency were carried out, taking into account the sensitivity of the crop to salts and the electrical conductivity of the water. Different scenarios were proposed for the same area and crop: constant flow and variable total dynamic head, variable flow and constant total dynamic head, variable total dynamic head and flow, constant total dynamic head and flow, and pumps in parallel. The energy costs were calculated without and with the frequency inverter. The permitted and permitted operating region was determined and the  $CO_2$  emissions were calculated without and with the frequency inverter for the different scenarios. The results were obtained that high energy efficiency values do not guarantee lower energy costs, however the use of frequency inverters allowed energy savings and emission reduction for the first scenario of 17.45 %, second scenario of 29 % and third. scenario of 29.30 % per year with respect to the non-use of the frequency variator, the variators allow the reduction of  $CO_2$  of all the scenarios proposed and the recovery of the investment varies between 5 to 8 years.

**Palabras Clave:** Water, Energy, Use efficient, Variable frequency drive, Costs energy, Emissions  $CO_2$ .

# I. INTRODUCCIÓN

Según el IV Censo Nacional Agropecuario del 2012, el 18 % del territorio nacional es de uso agrícola, y solo el 36 % tiene acceso al agua de riego, y las superficies con cultivo bajo riego lo hacen por un sistema de gravedad en un 88 % y un sistema presurizado en un 12 % (INEI, 2012). Aun así, durante las últimas décadas hemos adoptado este tipo de tecnología de riego por los grandes beneficios en el ahorro del uso del agua, pues mejora la gestión de este recurso de un 30 % a un 90 % comparadas con sistemas de gravedad (Antúnez et al., 2010).

Sin duda alguna estos sistemas de riego nos brindan un uso eficiente del agua. Sin embargo, la mayoría de áreas agrícolas regadas por este tipo de sistema presentan altos consumos de energía eléctrica principalmente por el equipo de bombeo, que es el encargado de suministrar la presión necesaria para que el agua pueda llegar a la planta. Los costos de energía por el sistema de bombeo pueden llegar a suponer para el agricultor un 30 a 40 % de los costos totales del cultivo (SIAR, 2009).

Con respecto a la fuente de energía de los sistemas de riego se produce por centrales: hidráulicas en un 57 %, la térmica con un 39 %, eólica 3 % y solar 1 % para el año 2021 (MINEM, 2021). Las centrales térmicas son las que más contribuyen al calentamiento global y emisiones de gases de efecto invernadero por la quema de combustibles fósiles (OSINERGMIN, 2016). Considerando que el sector de energía es el responsable por el 28.32 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (MINAM, 2021), es importante que se tomen medidas para una mejora considerable en el ahorro de energía, el Perú para el año 2010 aportaba solo el 0.3 % de gases de efecto invernadero a nivel global, por otra parte la nación se encuentra dentro de los países más vulnerables ante el impacto del cambio climático (MINAM, 2016).

Hoy en día existen varias medidas para el ahorro de energía y una de las más eficientes que se han desarrollado y aplicado son los ajustes de velocidad de la bomba por medio de los

variadores de frecuencia que permite controlar la velocidad del motor eléctrico de la bomba para regular el flujo de agua (Shankar et al., 2017). Una de sus grandes ventajas es el ahorro de energía entre el 30 y 60 %, además de reducir la corriente de arranque, reducción de costos de mantenimiento, evitar el golpe de ariete, entre otras (AkzoNobel, 2016).

Pero no solo basta tener un variador de frecuencia para tener ahorros de energía también es necesario tener un motor eléctrico eficiente pues representan un aproximado de 65 % del consumo de energía eléctrica en aplicaciones industriales para esto existen los motores de clase IE2, IE3 y IE4 que nos aseguran altas eficiencias en su motor (ABB, 2014). También es importante reconocer que los puntos de operación de la bomba se encuentren dentro los límites de la región de operación admisible y permisible para verificar que la bomba esté operando dentro de una región conveniente desde el punto de vista energético y económico (IANS, 2012). Finalmente con el consumo eléctrico y el factor de emisión se cuantifica las emisiones de CO<sub>2</sub> y se compara en cuanto se redujo las emisiones con las medidas a usar (Rodrigues et al., 2002).

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1. OBJETIVO GENERAL**

1. Diseñar y evaluar los escenarios para el uso eficiente del agua y energía en un sistema de riego presurizado, caso: Fundo agrícola - UNALM.

### **1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Diseñar el sistema de riego para un uso eficiente del agua y energía, utilizando energía eléctrica para los siguientes escenarios: a) caudal constante y altura dinámica total variable en los turnos, b) caudal variable y altura dinámica total constante en los turnos y c) caudal variable y altura dinámica total en los turnos.
2. Evaluar y comparar la eficiencia de riego y energía, costos energéticos, emisiones de CO<sub>2</sub>, ahorros en costos energéticos y reducciones de emisiones de CO<sub>2</sub> para diferentes escenarios en el Fundo agrícola.

## **II. REVISIÓN LITERARIA**

### **2.1. Uso eficiente del agua y energía en el sistema hidráulico de riego presurizado**

En la actualidad vemos el incremento del gasto eléctrico ya sea en zonas rurales o urbanas, uno de los factores importantes para la agricultura ha sido por la modernización de los sistemas de distribución de agua. Esta modernización se basa principalmente en el cambio de los sistemas basados en la gravedad de canales abiertos a los sistemas de tuberías a presión y el uso de ramas es decir sistemas de riego presurizados (Abadía et al., 2018). Aunque representa un consumo final de 3 % en el consumo total de sectores según el Banco de desarrollo de América Latina para el año 2014 presenta tendencia al crecimiento debido en gran medida a la evolución del regadío frente al secano y a la modernización de los sistemas de riego, que requieren mayor consumo de energía que los tradicionales (IDAE, 2008).

Las principales fuentes de consumo de energía en los sistemas de riego son dadas por la selección adecuada de los componentes del sistema, equipos de bombeo con motores de alta eficiencia y buen manejo de instalación. Si estas variables no funcionan a una alta eficiencia se tendrá un mayor consumo de electricidad.

### **2.2. Sistema de riego presurizado**

En los sistemas de riego presurizado el agua es conducida por tuberías y laterales de riego a cierta presión para que así pueda llegar a las plantas, se aplica por medio de los emisores que pueden ser: goteros, aspersores, micro aspersores, etc. Permite además la combinación de fertilizante con el agua de riego. Este tipo de sistema demanda un elevado consumo de energía por las bombas que son las encargadas de suministrar la presión necesaria. Sin em-

bargo, tienen una alta eficiencia de aplicación de agua de 50 a 95 % dependiendo del emisor (AERP, 2013).

## **2.3. Componentes de un sistema de riego**

Un sistema de riego presurizado está compuesto por los siguientes componentes.

### **2.3.1. Fuente de abastecimiento de agua**

El abastecimiento de agua puede provenir por la extracción de agua subterránea por un turno de red de riego, por canales que son dirigidos a los reservorios cuyas dimensiones dependen del área regar, su función es de abastecer de agua de forma continua al sistema de riego. Para su construcción es necesario una excavación buscando el talud requerido que dependerá del tipo de suelo que se tenga.

Existen varios tipos de reservorios, siendo los más comunes aquellos cubiertos por una membrana impermeable, el material más usado es el polietileno, el cual resiste los rayos ultravioletas y su espesor esta entre 500 micrones y 1 mm.

### **2.3.2. Cabezal de riego**

El cabezal de riego es el encargado de filtrar, tratar, medir y suministrar el agua hacia la de distribución y esta a los emisores, está conformado por un conjunto de elementos que son:

#### **Equipo de bombeo**

Está compuesta por una o varias bombas cuyo tamaño y potencia depende del área a regar. El dimensionamiento de esta debe ser tal que la presión requerida sea lo suficiente para vencer la diferencia de cota y las pérdidas de carga del sistema. Las bombas más usadas son las centrifugas suministradas por energía eléctrica (Liotta et al., 2015).

#### **Equipo de filtrado**

Depende de la calidad, el origen del agua y el tipo de emisor que se va a utilizar. Existen diferentes tipos de filtros, el de arena se usa para detener las partículas orgánicas en suspen-

sión, el de malla retiene sólidos en suspensión y el de anillos atrapa todo tipo de sólidos en suspensión (Fernández Gómez, 2010). En la Tabla 2.1 se muestra el tipo de filtro que se debe usar dependiendo del origen del agua.

**Tabla 2.1: Tipo de filtro respecto al origen del agua**

Requerimiento	Origen del agua		
	Pozo	Estanque	Canal
Hidrociclón	X		X
Gravas		X	X
Anillas	X	X(1)	X(1)
Malla	X	X	X

Fuente: AGROPECUARIAS (2010)

Para tener mayor eficiencia energética en el mercado existen filtros autolimpiantes de baja presión que son llamados también filtros low cost energy (LCE), el proceso de lavado es con poca agua y una presión requerida para el contra lavado de 1.5 bar por lo que el consumo será menor. Una de las empresas de riego que tiene estos filtros es Regaber en la Tabla 2.2 se muestra las características técnicas del producto.

**Tabla 2.2: Características técnicas del Filtro Mini Sigma**

Datos generales	2"	3"	4"
Caudal máximo (130 u) en agua de calidad media ( $m^3/h$ )	25	50	80
Presión de operación mínima durante la limpieza ( $bar$ )		1.5	
Presión de operación máxima ( $bar$ )		8	
Superficie de filtración ( $cm^2$ )	1200	1600	2400
Díametros entrada/salida ( $mm$ )	50	80	100
	BSPT/NTP	Brida Vic/Universal	Brida Vic/Universal
Peso vacío ( $kg$ )	16	20	23

Fuente: F.D.E.M. (nd)

## **Unidad de fertilización**

En esta unidad los fertilizantes que son requeridos por las plantas son combinados con el agua de riego, en tanto sean solubles, mejora la eficiencia de la fertilización, ahorrando agua y fertilizantes, ahorra tiempo, entre otros (Mancha, 2005). Se puede aplicar ácidos (ácidos fosfórico, nítrico, clorhídrico, entre otros), fungicidas y desinfectantes. Los equipos de ferti-irrigación más usados son: tanques de fertilización, inyector tipo Venturi e inyectores.

## **Aparatos de control y medición**

En el sistema de riego hay una variedad de elementos con diversas funciones y distintos tipos de accionamiento que posibilitan manejar y realizar el riego de la manera adecuada.

1. Elementos de control: Regulan la circulación del agua como su presión, aquí tenemos a los reguladores de presión que son usados para controlar la presión y válvulas que permiten controlar el paso del agua por la tubería.
2. Elementos de medida: Proporcionan información al sistema de caudal y volumen, tenemos a los caudalímetros y manómetros y transductores (sensores).
3. Elementos de protección: Son los encargados de proteger a la red de sobrepresiones o depresiones las más usadas son las ventosas, funcionan al encender o apagar el sistema de riego (Fernández Gómez, 2010).

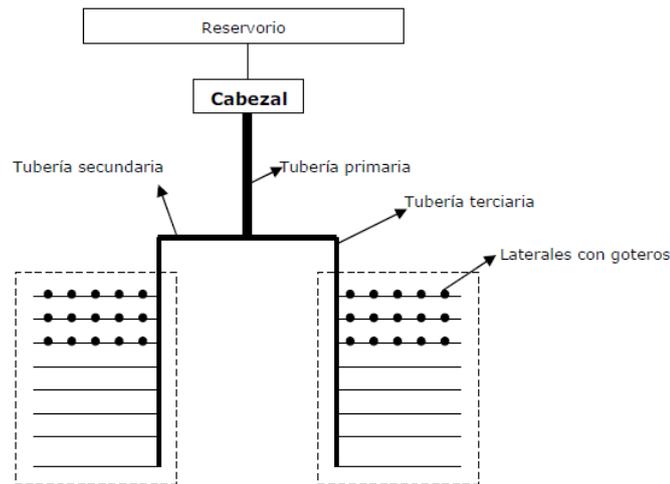
### **2.3.3. Red de distribución**

La red de distribución es importante en la eficiencia energética y hídrica, tiene que ver con el diseño y dimensionamiento de estas en el sistema de riego, esta consiste en tuberías, que llevan el agua desde el cabezal a las subunidades de riego y se componen de los siguientes elementos.

1. Tubería primaria o tubería matriz, parte desde el cabezal de riego y llega a las unidades de riego, el material adecuado es de PVC que es rígido y no deben ser expuestas a los rayos ultravioleta.
2. Tubería secundaria, parte de la tubería primaria y lleva el caudal a las subunidades de riego, el material adecuado es de PVC o PE que es más flexible y manejable.

3. Tubería terciaria o portalateral, es aquella que va directamente a los laterales de riego, el material adecuado es de PVC o PE.
4. Laterales de riego, se encuentran los emisores de riego (goteros), el material que se usa es el PE.

En la Figura 2.1 se muestra el esquema de distribución de los componentes de riego.



**Figura 2.1: Esquema de componentes de la red de distribución**

**Fuente: de Extensión Rural Pocito (2013)**

## Clases

Nos señala la presión máxima que aguanta la tubería, llamada presión nominal. De acuerdo a la Norma Técnica Peruana (NTP – ISO 4422), se dispone las características dimensionales y de resistencia para satisfacer diversas exigencias de uso. Si es de clase 5 soportará una presión de 5 bares, la clase está también relacionada con el espesor de la tubería, a mayor clase será mayor su espesor del mismo diámetro (S.A., 2006).

### 2.3.4. Emisores

Son los componentes de la red que aplican y distribuyen el agua hacia las plantas, además permite el controlado uso del agua. Existen diferentes tipos de emisores como: goteros, microaspersores y difusores.

El riego por goteo permite la aplicación del agua a la planta en forma de gotas, la cual brinda la cantidad necesaria al cultivo. Existen variedades de goteros de diferente forma y configuración: de laberinto, tipo vortex y cintas. También se diferencian por su mecanismo de regulación de presión y se clasifican en autocompensantes que mantiene el mismo caudal así varié la presión y los no compensados los cuales no tienen un mecanismo de regulación del caudal al variar la presión, por ello tienen un menor precio (Liotta et al., 2015).

Las ventajas del riego por goteo son:

1. Ahorro de agua.
2. Se adecua a cualquier tipo de suelo y diferentes condiciones topográficas.
3. El fertilizante se utiliza de forma paralela al riego.
4. Alcanza eficiencia de aplicación entre 90 a 95 %.
5. Se puede utilizar aguas salinas, lo que dependerá de la tolerancia de salinidad del cultivo.
6. No se ve afectada por grandes vientos, pues el agua es aplicada de forma directa a la planta (Alirio, 2013).

### **Ecuación del emisor**

La Ecuación 2.1 nos relaciona el caudal y la presión de entrada.

$$q = k \times h^x \quad (2.1)$$

Donde:

q = caudal del emisor (l/h)

k = coeficiente de descarga

x = exponente de descarga del emisor

h = presión hidráulica a la entrada del emisor (m.c.a)

n = Número de alternativas

La variable “x” puede tomar diferentes valores si es 0 es un gotero auto compensado, si es 1 el flujo es laminar y si es 0.5 es un flujo turbulento.

### **Obstrucciones en los emisores**

Para tener el caudal nominal necesario es importante tener en cuenta que los emisores están expuestos a obstrucciones por material sedimentable, depende de que tipo de emisor se tenga, diámetro de paso, recorrido del agua y velocidad de circulación del agua en el emisor (Pizarro Cabello, 1996).

El grado de sensibilidad de obturación respecto al diámetro mínimo de los emisores se muestra en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3: Clasificación de los emisores respecto a la sensibilidad de obturación**

Diámetro mínimo (mm)	Sensibilidad a la obturación
$\leq 0.7$	Alta
0.7 - 1.5	Media
$>1.5$	Baja

## **2.4. Necesidades hídricas de los cultivos**

Es la cantidad de agua que necesita para satisfacer la pérdida por la evaporación del suelo y transpiración del cultivo a través de las estomas. Los parámetros climatológicos que los alteran son la radiación solar, temperatura del aire, humedad atmosférica, velocidad del viento, salinidad del suelo y el agua de riego, también depende de las características del cultivo y estado de desarrollo.

### **2.4.1. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>)**

La ET<sub>o</sub> expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo, se calcula con los datos meteorológicos. El único método recomendado para calcularlo con datos meteorológicos es el de FAO Penman-Monteith.

### **2.4.2. Coeficiente de cultivo (Kc)**

El Kc varía principalmente en función de las características particulares de cada cultivo, en una pequeña proporción dependiendo del clima. Cambia en los periodos de crecimiento del cultivo que son cuatro: inicial, de desarrollo del cultivo, de mediados del cultivo y de final de temporada.

### **2.4.3. Evapotranspiración del cultivo (ETc)**

El valor de ETc es calculado a través del enfoque del coeficiente del cultivo (Ecuación 2.2), donde los efectos de las condiciones del tiempo atmosférico son incorporados en ETo y las características del cultivo son incorporadas en el coeficiente Kc (Allen et al., 2006).

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (2.2)$$

Donde:

$ET_c$ : evapotranspiración del cultivo

$ET_o$ : evapotranspiración de referencia

$K_c$ : coeficiente del cultivo (adimensional)

## **2.5. Uso Eficiente del recurso hídrico**

### **2.5.1. Coeficiente de uniformidad (CU)**

El sistema de riego a presión nos ofrece una uniformidad de aplicación, pero para esto se tiene que realizar un mantenimiento adecuado al sistema tanto en el punto de vista de hidráulico como agronómico. El cálculo de coeficiente de uniformidad sirve para medir la uniformidad de riego en los cultivos, para tener la seguridad de un buen aprovechamiento energético, pues a una mayor uniformidad de aplicación, menor será la lámina de riego a aplicar (Agropecuaria, 2013).

El CU debe ser lo más cercano al 100 % y no menor al 90 %, con este procedimiento se tendrá la seguridad de la eficiencia del funcionamiento del equipo de riego, es recomendable realizarlo por lo menos una vez al año o cuando se vea que el sistema no está funcionando de forma correcta (Liotta, 2006).

## 2.6. Pérdidas de carga por fricción y singularidades

Para estimar la pérdida de carga por fricción en tuberías se utiliza la Ecuación 2.3 de Hazen-Williams:

$$h_f = 1,21 \times 10^{10} \times L \times \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852} \times d^{-4,87} \quad (2.3)$$

Donde:

$h_f$ : pérdida de carga debido al rozamiento(m)

C: factor de fricción de Hazen-Williams

L: longitud de la tubería(m)

D: diámetro interior(mm)

Q: caudal del agua en la tubería (l/s)

Y la pérdida de carga por singularidades es el 10 % de la pérdida de carga en la matriz (Pizarro Cabello, 1996).

## 2.7. Selección de tuberías

Se puede calcular el diámetro de las tuberías por medio de dos formas por la velocidad máxima permisible o por una selección técnica económica.

### 2.7.1. Velocidad máxima permisible

Por medio de la ecuación de continuidad, donde el caudal atraviesa una sección a cierta velocidad de circulación del agua en un tiempo determinado, despejando la velocidad se calcula la velocidad crítica en la Ecuación 2.4.

$$V = \frac{\frac{Q}{1000} \times 4}{\pi(d \times 0,001)^2} \quad (2.4)$$

Donde:

V: velocidad máxima permisible (m/s)

Q: caudal (l/s)

d: diámetro de la tubería (m)

La velocidad de las tuberías de riego varían entre 0.5 a 3 m/s ,si sobrepasan estas velocidades se produciría una sobrepresión ocasionando desgaste y abrasión en tuberías y elementos de los dispositivos, si al contrario de sobrepasar la velocidad es menor o igual a 0.5 m/s se produciría sedimentaciones en el interior de las tuberías (Monge Redondo, 2019).

### **2.7.2. Selección técnica económica de tuberías**

Otra forma de seleccionar las tuberías es con la selección técnica económica, que está en función de los costos fijos anuales y costos variable o energéticos. Al seleccionar una tubería de diámetro pequeño puede que se requiera una inversión inicial menor, no obstante, la perdida de carga por la fricción será mayor y esto hará que aumente el costo de energía.

Para que este no sea el caso se realiza un análisis de optimización, para calcular el costo fijo de tubería con el factor de recuperación del capital (CRF) que se calcula con la Ecuación 2.5.

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2.5)$$

Donde:

i: tasa de interés anual (S)

n: vida útil de la tubería (años)

Para los costos variables, es necesario conocer los costos anuales de potencia de la bomba y la perdida de energía por fricción de tubería (Sonowal et al., 2016).

El diámetro óptimo será aquel valor que presente el costo de bombeo y el costo fijo o anualizado menor, de los resultando obtenidos se obtiene una gráfica de costos fijos y costos variables como se presenta en la Figura 2.2.

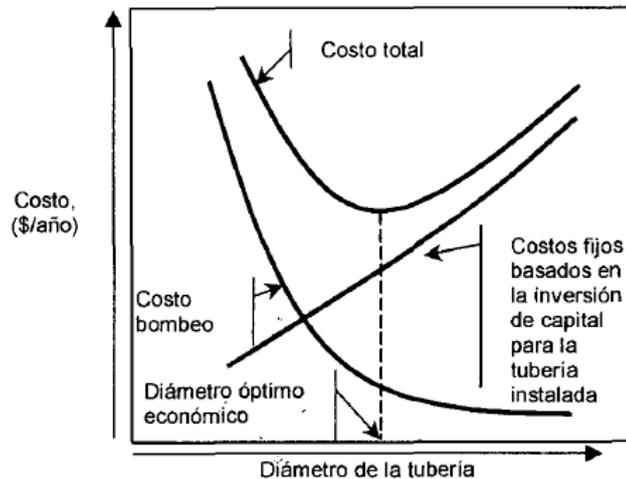


Figura 2.2: Selección técnica económica de tuberías

Fuente: Narvaez and Galvano (2002)

## 2.8. Sistema de bombeo

Las bombas representan el mayor gasto de energía en el sistema de riego debido al uso de energía eléctrica para su funcionamiento, son las principales componentes del sistema de riego, debido a que otorgan la presión y caudal necesario para los cultivos. Pueden estar conformado por una o varias bombas, estas son maquinas hidráulicas que sirven para transformar la energía mecánica de un impulsor a energía cinética de un fluido incomprensible (Díez, 2007).

Producen costos importantes en el sistema de riego es por esto que es importante saber que mientras menos tiempo trabaje el equipo de bombeo y menos presión de trabajo necesite el sistema será más eficiente energéticamente.

Hay dos grupos principales de bombas; las de desplazamiento positivo y las centrífugas estas últimas son las que más se utilizan en la industria y en los sistemas de riego. Las bombas centrífugas transfieren energía al fluido a través de un impulsor, el líquido ingresa en la suc-

ción y pasa al centro del impulsor donde se acelera para alcanzar gran velocidad, después pasar por el difusor para que la carga de la velocidad se convierta en carga de presión que sale por la descarga de la bomba.

Las bombas centrífugas pueden ser horizontales, verticales, montadas en bastidor y de acoplamiento directo y hay tres categorías que se dividen por dirección de flujo en tres grupos axiales, radiales y mixta

- Bomba centrífuga de flujo axial: el fluido entra por el impulsor en dirección axial y lo abandona por la misma dirección. Además, son las más aptas para gran cantidad de caudal a menores presiones.
- Bombas centrífugas de flujo radial: integra impulsores con alabes, el movimiento del fluido es perpendicular al eje del rodete, son adecuadas para menores caudales y mayores presiones.
- Bombas centrífugas de flujo mixto: el fluido entra al impulsor en dirección axial y sale en la dirección radial y axial, se utilizan para presiones y caudales intermedios (Blanco, 2018).

### 2.8.1. Eficiencia de la bomba

Eficiencia de una bomba es el rendimiento, es decir cuanta potencia eléctrica necesita para producir una potencia hidráulica. Mientras el líquido es impulsado por el sistema existe una pérdida de energía que se ve reflejado en las potencias de la bomba. En la Figura 2.3 vemos cuatro potencias desde que arranca el motor hasta la salida del fluido.

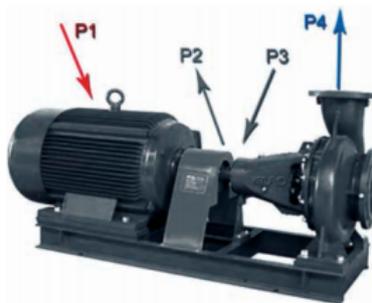


Figura 2.3: Esquema de potencias en una bomba

Fuente: Cuartero Abengózar (2015)

Donde, P1 es potencia eléctrica la cual es absorbida por el motor, P2 es potencia mecánica o nominal en el eje del motor, P3 es potencia absorbida por el eje de la bomba y P4 es potencia hidráulica dada al fluido. Entre la P1 y P2 hay una pérdida de energía eléctrica, magnética, hierro y mecánicas, su relación es la de rendimiento mecánico (Ecuación 2.6).

$$\text{rendimientomecnico} = \frac{P2}{P1} \quad (2.6)$$

La potencia perdida entre P3 y P4 es causada por el rozamiento y turbulencia en el interior de la bomba, su relación es el rendimiento hidráulico (Ecuación 2.7).

$$\text{rendimientohidraulico} = \frac{P4}{P3} \quad (2.7)$$

La potencia hidráulica (P4) en watos, se calcula con la Ecuación 2.8:

$$P4 = \rho \times g \times Q \times H \quad (2.8)$$

Donde:

$\rho$ : densidad del líquido (kg/m<sup>3</sup>)

g: gravedad (m/s<sup>2</sup>)

Q: caudal (m<sup>3</sup>/s)

H: presión (m)

La relación entre P2 y P4 es el rendimiento de la bomba (Ecuación 2.9).

$$\text{rendimientodelabomba} = \frac{P4}{P2} \quad (2.9)$$

Este último rendimiento es el que define que bomba es más eficiente energéticamente, en el mercado existen bombas desde un 20 % de energía hasta valores de 80 % o más, esto hará una gran diferencia en términos energéticos (Cuartero Abengózar, 2015).

## 2.8.2. Curvas características de la bomba

Las curvas características son gráficas que relacionan diferentes variables del caudal con altura dinámica total, rendimiento, potencia y carga neta positiva de aspiración requerida. Es necesario conocerlas para poder seleccionar la adecuada para la instalación, cada bomba tiene su propia curva, que se realizan en bancos de pruebas con una velocidad constante y regulando el caudal, y cada curva depende del diámetro del impulsor a menor diámetro tendremos menores cargas o alturas de bombeo.

- Curva altura dinámica total -caudal (ADT-Q): También llamada altura total desarrollada es igual a la altura de descarga total menos la altura de succión en metros.
- Curva eficiencia-caudal( $\eta$ -Q): Comienza desde cero la curva aumentando rápidamente a medida que el caudal aumenta.
- Curva potencia-caudal(P-Q): La potencia absorbida depende del caudal y la altura dinámica, es la potencia de la bomba para accionar al eje.
- Curva altura neta positiva en la aspiración-caudal (NPSHr-Q): Es la presión mínima en la entrada de la bomba para que no se produzca cavitación. Para que la bomba funcione sin cavitación se cumplirá que el NPSH disponible debe ser mayor al requerido (Stewart, 2019).

En la Figura 2.4, tenemos las curvas características para una bomba centrífuga vertical de la marca Grundfos con una velocidad de rotación constante  $n = 2927$  rpm, un caudal de 24.71 l/s y una altura de 16.96 m.

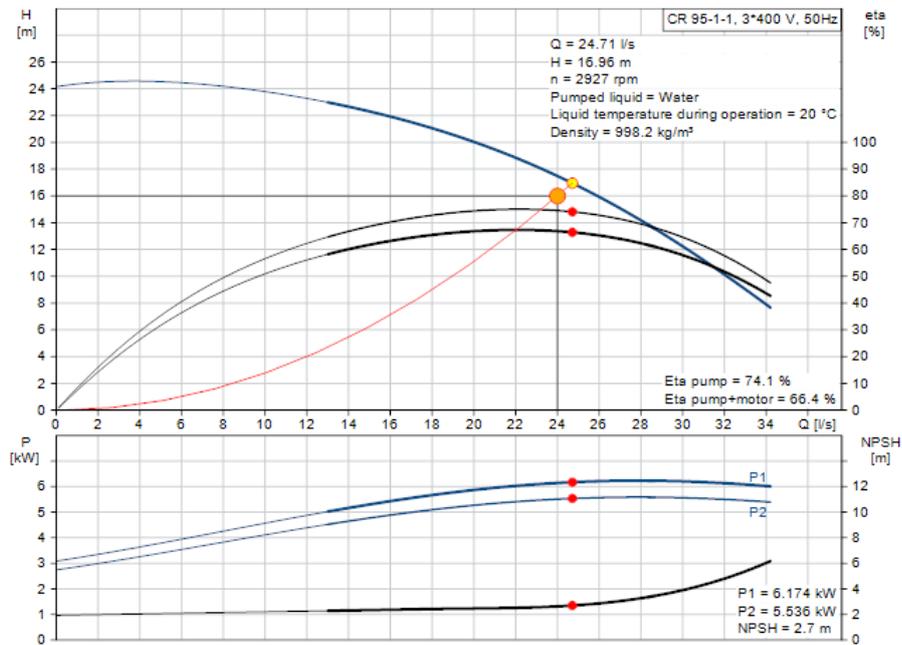


Figura 2.4: Curvas características de una bomba centrífuga vertical modelo CR 95-1-1 AFAE-HQQE

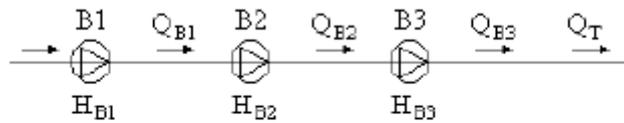
Fuente: Grundfos (nd)

### 2.8.3. Configuraciones de una bomba

En la instalación de riego se pueden trabajar con uno o varias bombas esto dependerá si la bomba alcanza el requerimiento, se posicionan en:

#### Bomba en serie

Cuando no se puede alcanzar la altura o cabezal requerido es necesario utilizar bombas en serie a un caudal constante pues la tubería de aspiración de una bomba pasa a ser la tubería de aspiración de la unidad, por lo cual el caudal es el mismo. En la Figura 2.5 se aprecia el acoplamiento de varias bombas en series.



$$Q_T = Q_{\text{conjunto}} = Q_{B1} = Q_{B2} = Q_{B3} = \dots = Q_{Bn}$$

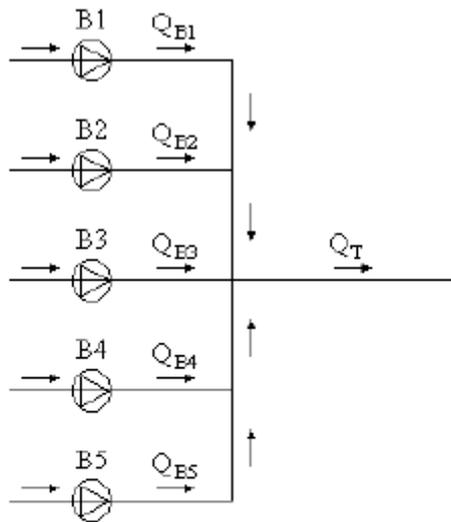
$$H_{BT} = H_{B1} + H_{B2} + H_{B3} + \dots + H_{Bn}$$

**Figura 2.5: Acoplamiento de bomba en serie**

**Fuente: Marvello Pérez (2015)**

### Bomba en serie

Al no alcanzar el caudal requerido se acoplan la bomba en paralelo, cada una de estas aspira el fluido de un depósito común manteniendo la altura, en este caso los rotores se suman en sentido al eje. En la Figura 2.6 se observa la configuración de bombas en paralelo.



$$Q_T = Q_{\text{conjunto}} = Q_{B1} + Q_{B2} + Q_{B3} + \dots + Q_{Bn}$$

$$H_{BT} = H_{B1} = H_{B2} = H_{B3} = \dots = H_{Bn}$$

**Figura 2.6: Acoplamiento de bomba en paralelo**

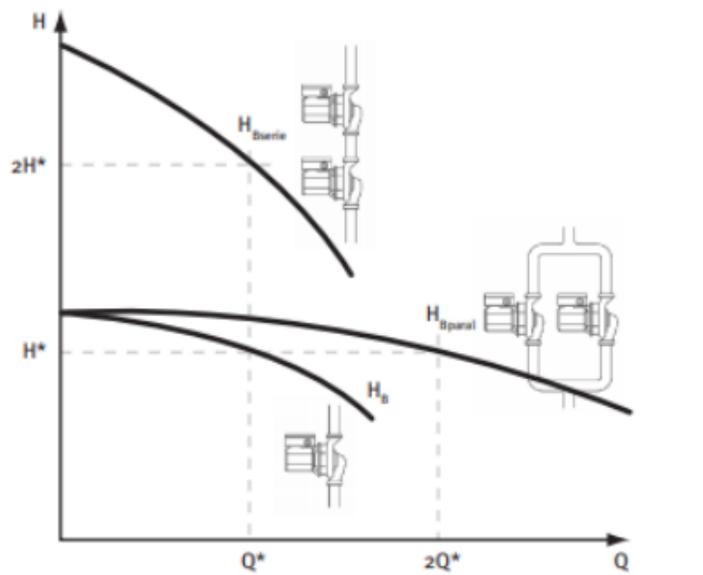
**Fuente: Marvello Pérez (2015)**

Las leyes fundamentales del comportamiento hidráulico trabajando en esta configuración son:

1. Se suman los caudales de las diferentes bombas para alturas iguales en nodo común.

2. La potencia resultante es la suma de las potencias para las alturas iguales de cada caudal.
3. La eficiencia en caso de bombas de iguales características, será igual a la de una bomba, pero si tiene diferentes características se determina para cada altura con la potencia de combinación que son las suma de las potencias individuales (Martínez Valdés and Riaño Valle, 2010).

En la Figura 2.7 vemos el comportamiento de las dos configuraciones de la bomba en la gráfica de presión versus caudal.

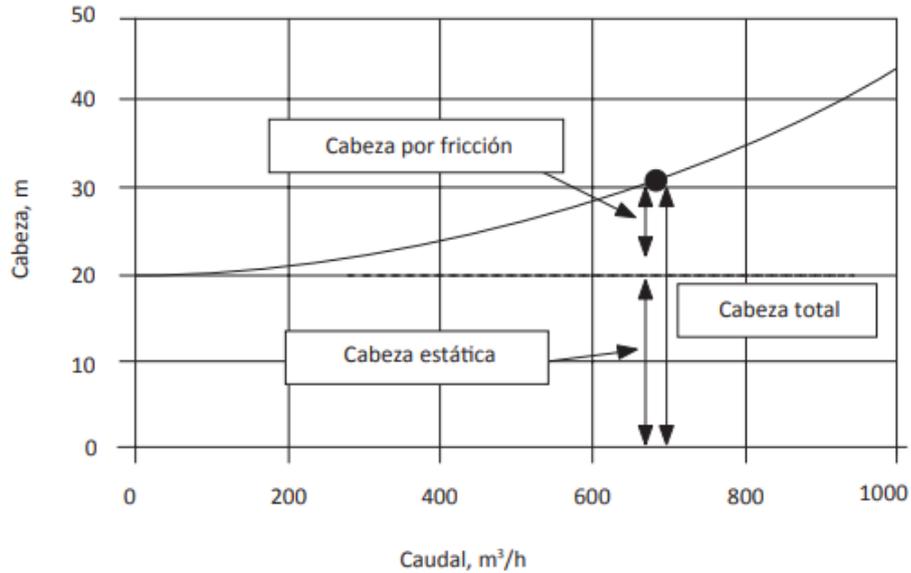


**Figura 2.7: Acoplamiento en serie y en paralelo de dos bombas iguales**

Fuente: ATECYR (2012)

#### 2.8.4. Curva del sistema

La curva del sistema está conformada por dos partes la cabeza estática y la cabeza por fricción la suma de estos me da la cabeza total, la cabeza estática es la distancia vertical entre los niveles de succión y descarga y la cabeza por fricción es la energía que se tiene que vencer el líquido sobre la resistencia de las tuberías de succión, descarga y accesorios. En la Figura 2.8, se observa los componentes del sistema de la curva del sistema.



**Figura 2.8: Componentes de la curva del sistema**

**Fuente: Blanco (2018)**

Este sistema se caracteriza por tener condiciones de régimen permanente y turbulento, la curva del sistema se estima con la Ecuación 2.10.

$$H_{sist} = H_{est} + Kt + Q^2 \quad (2.10)$$

Donde:

$H_{sist}$ : carga del sistema (m)

$H_{est}$ : carga estática del sistema (m)

$Q$ : caudal (m<sup>3</sup>/s)

$Kt$ : coeficiente de resistividad de la tubería (s<sup>2</sup>/m<sup>5</sup>)

### 2.8.5. Ecuaciones matemáticas de las curvas características

Si bien las curvas características nos brindan el comportamiento de la bomba, existen distintas aplicaciones que requieren ser analizadas como el cambio de velocidad, ser operadas en paralelo o serie entre otras, esto es posible con las ecuaciones matemáticas, para esto se basa de las ecuaciones que modelan las cuatro curvas características que son.

- Curva altura dinámica total -caudal (ADT-Q):

$$ADT = A \pm BQ - CQ^2 \quad (2.11)$$

- Curva altura eficiencia-caudal ( $\eta$ -Q):

$$\eta = GQ - HQ^2 \quad (2.12)$$

- Curva altura potencia-caudal (P-Q):

$$P = D \pm EQ \pm FQ^2 \quad (2.13)$$

- Curva altura NPSHr-caudal (NPSHr-Q):

$$NPSHr = I + JQ + KQ^2 \quad (2.14)$$

Donde A, B, C, D, E, F, G, H, I, J y K son coeficientes del polinomio representativos de cada una de sus curvas.

Para conocer el comportamiento de n bombas colocadas en paralelo de iguales características, se realiza el Método de Áreas, donde se halla los coeficientes de las curvas, teniendo como resultado.

- Curva altura dinámica total -caudal para diferente número de bombas acopladas en paralelo (ADTp-Q):

$$ADT = A \pm \frac{B}{nb}Q - \frac{C}{nb^2}Q^2 \quad (2.15)$$

- Curva eficiencia -caudal para diferente número de bombas acopladas en paralelo ( $\eta_p$ -Q):

$$\eta = \frac{G}{nb}Q - \frac{H}{nb^2}Q^2 \quad (2.16)$$

- Curva potencia -caudal para diferente número de bombas acopladas en paralelo (Pp-

Q):

$$P = Dnb \pm EQ \pm \frac{F}{nb^2}Q^2 \quad (2.17)$$

Donde nb es número de bombas acopladas en paralelo (Martínez Valdés and Riaño Valle, 2018).

### 2.8.6. Leyes de afinidad

Las leyes de afinidad (Socorro Santos Acevedo et al., 2016), manifiestan la relación de diferentes variables como caudal, altura dinámica total, potencia, velocidad de la bomba que están involucradas con el rendimiento de las bombas (Ecuación 2.18).

$$\begin{aligned} \frac{Q1}{Q2} &= \frac{N1}{N2} \\ \frac{ADT1}{ADT2} &= \left(\frac{N1}{N2}\right)^2 \\ \frac{P1}{P2} &= \left(\frac{N1}{N2}\right)^3 \end{aligned} \quad (2.18)$$

Donde:

ADT: altura dinámica total (m)

P: potencia en la entrada de la bomba (kW)

Q: caudal (l/s)

N: velocidad de la bomba (rpm)

En la Figura 2.9 se muestra las curvas de altura manométrica, potencia y rendimiento a diferentes revoluciones por minuto.

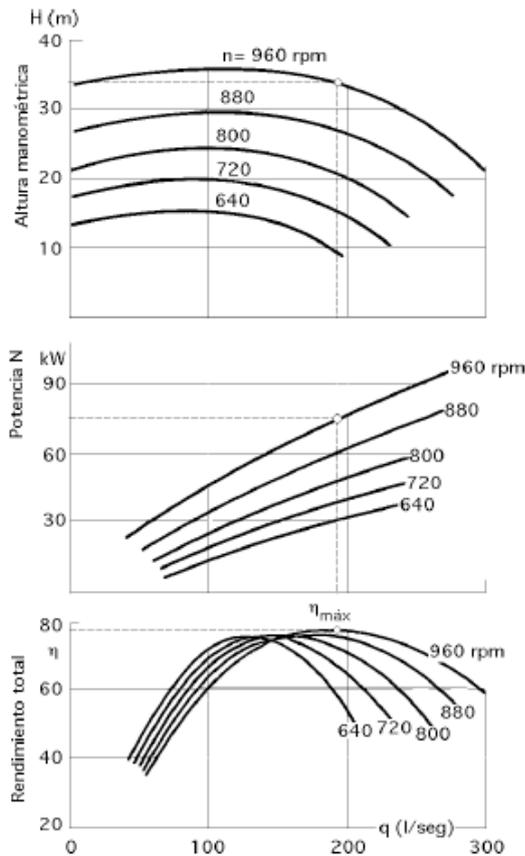


Figura 2.9: Ensayo completo de una bomba centrífuga a diferentes N° RPM

Fuente: Fernández Díez (2000)

## 2.9. Región de operación admitida y permitida

Las regiones se utilizan para verificar que las bombas operen dentro de una región adecuada desde el punto de vista energético y económico, además para verificar que operen en regiones que no comprometan su integridad y vida útil.

### 2.9.1. Región de operación admitida (AOR)

Es un rango de caudales a cada lado del punto de máxima eficiencia ( $Q_{BEP}$ ), que permite que la operación sea confiable y eficiente de la bomba, tiene un mayor rango de caudales que la región de operación permitida y los límites de este rango de caudales son definidos por los fabricantes de cada equipo. Los objetivos del establecimiento de esta zona son:

1. Preserva el equipo en cuanto a su integridad y vida útil.

2. Bomba trabaja de forma eficiente.
3. Mínimas pérdidas hidráulicas.
4. Menor vibración.

### 2.9.2. Región de operación permitida (POR)

Es un rango de porcentaje de caudales a cada lado del punto de máxima eficiencia ( $Q_{BEP}$ ), donde el rendimiento hidráulico de la bomba no se degrada considerablemente, que asegura un menor consumo de energía. El objetivo de esta región es de indicar dentro que límites se puede operar la bomba en forma energéticamente eficiente.

En la Tabla 2.4 se muestra el criterio utilizado para fijar la región de operación permitida que es con la práctica ANSI/HI 9.6.3.-2012 o la norma API 610/ISO 13709.

**Tabla 2.4: Practica ANSI/HI 9.6.3 -2012**

Velocidad específica Ns		Región de operación preferida
IS	US	(POR)
$\leq 87$	$\leq 4500$	Entre 70 % y 120 % del caudal del BEP
$>87$	$>4500$	Entre 80 % y 120 % del caudal del BEP

Fuente: IDAE (2005)

En la Figura 2.10, vemos la región de operación permitida y la energía mecánica que utiliza la bomba utilizada para convertirla en energía hidráulica, donde se ve que hay menores pérdidas a comparación de la región de operación admitida, y fuera de la región admitida sus pérdidas superan a la de la región admitida (Cifuentes, 2020).

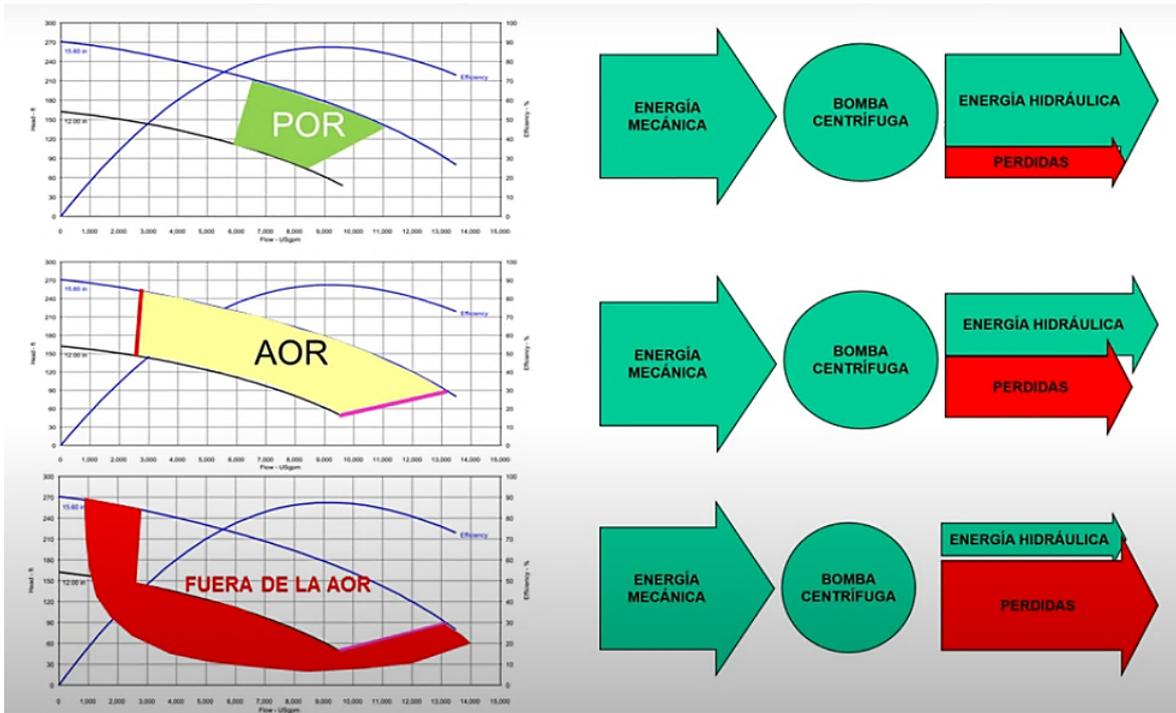


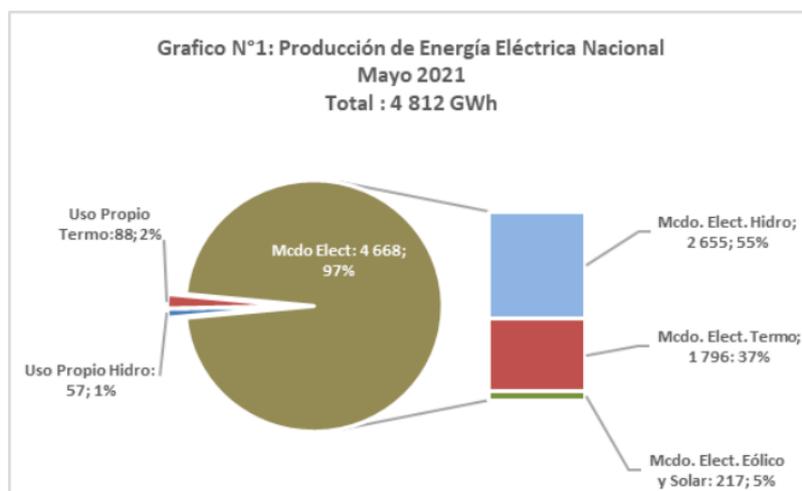
Figura 2.10: Región de operación permitida (POR) y región de operación admitida (AOR)

Fuente: Cifuentes (2020)

## 2.10. Eficiencia energética

La eficiencia energética junta acciones que se toman tanto de la oferta como de la demanda, sin sacrificar el bienestar ni la producción, permitiendo mejorar la seguridad del suministro. Además, logra, ahorros tanto en el consumo de energía como en la economía de la población. El ahorro y la eficiencia energética son los elementos principales para poder mejorar el medio ambiente, estos parámetros tienen que ver con el calentamiento global.

Al igual que se logra reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero que son producidas por las centrales térmicas (térmica) una de las dos fuentes principales de energía del Perú, la otra fuente es la central hidroeléctrica (hidráulica), en la Figura 2.11 observamos la producción de energía eléctrica a nivel Nacional donde la energía hidráulica tiene una participación de 57 % y la térmica de 39 %.



**Figura 2.11: Producción de energía eléctrica en el Perú para Mayo del 2021**

Fuente: MINEM (2021)

### **2.10.1. Eficiencia energética en sistemas de riego y medidas para el ahorro**

Se puede tener eficiencia energética en los sistemas de riego por dos aspectos:

- Por la disminución de consumo de agua como efecto de un mejor conocimiento de las necesidades hídricas del sistema de riego o la modernización del sistema para el aumento de eficiencia de riego.
- Por la correcta adecuación en los sistemas de bombeo, por el uso de variadores de frecuencia para diferentes regímenes de caudales, mejora en los rendimientos de las bombas, automatización del sistema, diseño de redes optimizadas energéticamente, mejora del factor potencia, entre otras (IDAE, 2005).

### **2.10.2. Consumo energético en los sistemas de bombeo**

El uso de los sistemas de bombeo es con frecuencia más de 2000 horas al año, con un 20 % de consumo eléctrico a nivel mundial. El costo total del ciclo de vida de estos sistemas se manifiesta por los costos de adquisición, costo de mantenimiento e instalación y costos energéticos. El consumo energético, es la cantidad de energía eléctrica consumida por una maquina o artefacto, que depende de la potencia y la cantidad de tiempo que es utilizada y se mide en kiloWatts-hora (kWh) (Barreda Trujillo, 2012).

## 2.11. Eficiencia energética en motores eléctricos

### 2.11.1. Descripción y funcionamiento

El motor eléctrico es una maquina eléctrica que transforma energía eléctrica en energía mecánica por medio de la acción de campos magnéticos que mueven la parte giratoria que se encuentra cableado a la bobina, los tipos más comunes son: motores de corriente continua y corriente alterna, en esta tenemos motor síncrono y motor asíncrono que pueden controlarse por un variador de frecuencia.

### 2.11.2. Potencia y eficiencia del motor

La potencia eléctrica nos brinda la cantidad de energía eléctrica y se puede hallar de dos formas con la eficiencia del motor que es la relación entre la potencia de la bomba (Ecuación 2.19) y potencia eléctrica (Ecuación 2.20), y la otra con las características eléctricas del motor.

$$P_e = \frac{P_{bomba}}{\eta_{motor}} \quad (2.19)$$

$$P_e = \sqrt{3} \times V \times I \times \frac{\cos\theta}{1000} \quad (2.20)$$

Donde

$P_e$ : potencia mecánica o potencia nominal (kW)

$\eta_{motor}$ : eficiencia del motor (adimensional)

$V$ : voltaje en línea (Voltios)

$I$ : intensidad de corriente que consume el motor (Amperes)

$\cos\theta$ : factor de potencia del motor

Si la red es monofásica no se coloca la  $\sqrt{3}$  (Trujillo Barreda, 2012).

### 2.11.3. Consumo energético

Los motores eléctricos son uno de los principales consumidores de energía llegando hasta un 70 % del consumo de energía eléctrica en la industria, es por esto que es necesario tener la seguridad de tener motores de altas eficiencias para menores tarifas eléctricas y menores emisiones de dióxido de carbono.

### 2.11.4. Normativa sobre eficiencia energética en motores eléctricos

Para poder clasificar un motor en función a la eficiencia existe nomenclaturas que están dadas por la norma IEC 60034-30-1 para 50 y 60 Hz, estas son: IE1 de eficiencia básica, IE2 de eficiencia alta, IE3 de eficiencia premium y IE4 de eficiencia super premium. (Guatemala, 2010). En la Figura 2.12, vemos las cuatro eficiencias IE para motores de 4 polos a 50 Hz.

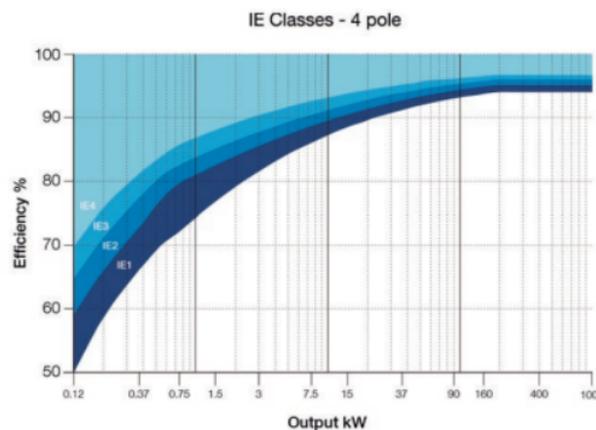


Figura 2.12: Gráfica de eficiencia VS salida en kW

Fuente: ABB (2014)

Utilizando por lo menos un motor con eficiencia energética de IE2, se tendrá ventajas como reducir hasta un 40 % la pérdida de energía, la vida del motor mejorará al trabajar con menores temperaturas, menores vibraciones, entre otras (Cuartero Abengózar, 2015).

## 2.12. Controles de caudal

Los dos modos más comunes para controlar el caudal en un sistema de riego son por el modo de control por: estrangulación o un VDF, los dos modifican la curva del sistema y la opción que más se usa aún es la primera.

### 2.12.1. Modo de control por estrangulación

El control se da por medio de una válvula reguladora, al cerrarla se modifica la curva del sistema disminuyendo el caudal de impulsión hasta tener el valor deseado, es el método más empleado, pero no es energéticamente eficiente, aunque se llega a una disminución de energía total consumida. En la Figura 2.13, observamos la regulación del punto de funcionamiento por una válvula en la cual se llega a disminuir el caudal, pero la presión aumenta.

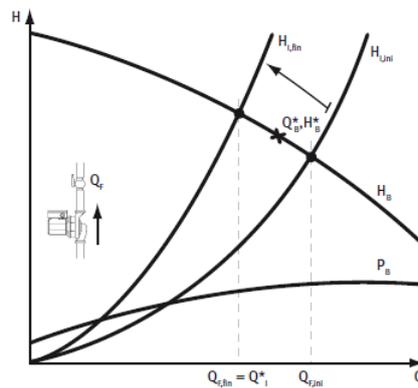
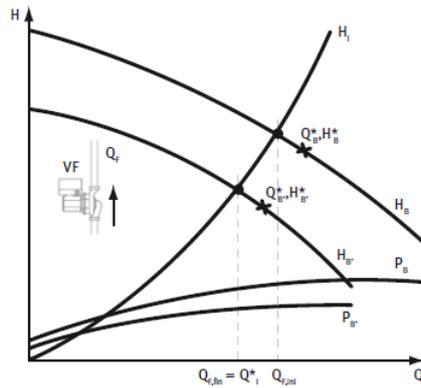


Figura 2.13: Regulación del punto de funcionamiento por una válvula

Fuente: ATECYR (2012)

### 2.12.2. Modo de control por VDF

Con un variador de frecuencia es posible cambiar la curva característica de la bomba y el punto de funcionamiento, este tipo de control es muy eficiente energéticamente pues no hay pérdidas adicionales porque el punto de requerimiento se ajusta completamente a la curva. En la Figura 2.14 vemos la regulación de caudal por variación del régimen de giro de la bomba.



**Figura 2.14: Regulación por variación del régimen de giro de la bomba**

**Fuente: ATECYR (2012)**

El uso de variadores de frecuencia es muy usado en sistemas de riego con caudales variables (ATECYR, 2012).

## **2.13. Eficiencia energética por medio de variadores de frecuencia**

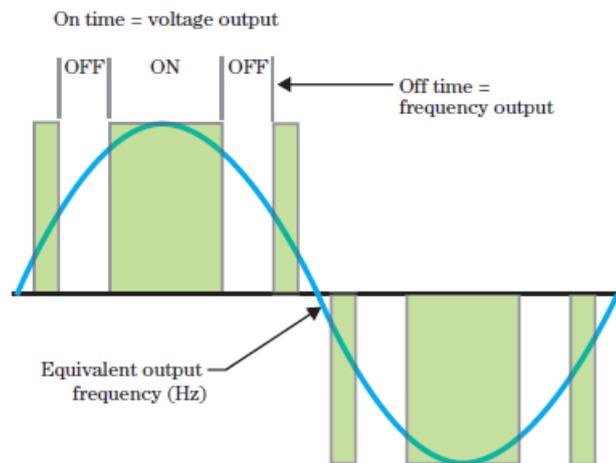
### **2.13.1. Descripción y funcionamiento**

Un variador de frecuencia conocido por sus siglas VDF es un sistema de accionamiento electrónico que es utilizado para variar la velocidad de giro del motor controlando la frecuencia y el voltaje de entrada.

El circuito electrónico de un variador de frecuencia se divide en cuatro etapas principales:

- **Etapla rectificadora:** La corriente alterna (CA) se transforma a corriente continua (CC), por medio de diodos rectificadores.
- **Bus de continua:** los condensadores se encargan de almacenar y filtrar la CC rectificada para así tener tensión continua estable y reservar energía.
- **Etapla de salida:** un ondulator convierte la energía en una salida trifásica donde los valores de intensidad, tensión y frecuencia de salida son variables, mediante un PWM (modulación por ancho de pulsos) se obtiene las señales de salida.

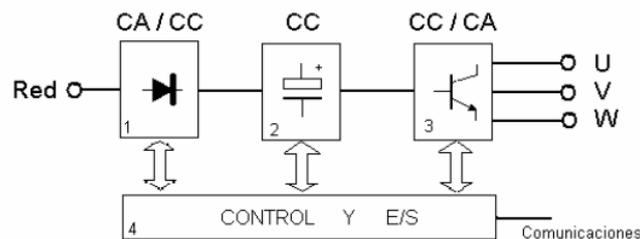
El PWM crea una serie de pulsos de voltaje fijo y duración de tiempo ajustable (ancho). La suma de los anchos de los pulsos y los ciclos de apagados intermedios determinan la frecuencia resultante de la onda. La suma de las áreas de pulso es igual al voltaje efectivo de la onda sinusoidal de CA verdadera. Variando el ancho de los pulsos, se pueden simular diferentes longitudes de onda de corriente alterna para emular frecuencias variables y se controla la velocidad del motor. La Figura 2.15 ilustra una forma de onda generada por un inversor PWM.



**Figura 2.15: Forma de onda generada por modulación de ancho de pulso**

**Fuente: USDA (2014)**

En la Figura 2.16 se muestra las etapas para el funcionamiento del variador de frecuencia.



**Figura 2.16: Diagrama en bloques de un variador**

**Fuente: of Agriculture (2011)**

of Agriculture (2011) relaciona la frecuencia con la velocidad de un motor en la siguiente Ecuación 2.21:

$$n = 60 \times \frac{f}{2p} \quad (2.21)$$

Donde

n: velocidad en revoluciones por minuto en el eje (rpm)

f: frecuencia de la red (Hz)

2p: número de pares de polos del motor

No es recomendable disminuir la velocidad de giro de la bomba debajo del 50 % de su velocidad nominal.

### **2.13.2. Ahorro energético por el uso de variadores de frecuencia**

Las ventajas de los variadores de frecuencia para el sistema de bombeo son:

- Un ahorro de energía de 30 a 50 % de energía eléctrica, mejorando así la eficiencia energética y reduciendo el consumo de energía y emisiones de dióxido de carbono (AkzoNobel, 2016).
- Aumento de la vida útil de los motores ya no habrá arranques directos, sino que serán pausados y se evitara el golpe de ariete (AZUD, 2018).

### **2.13.3. Modos de funcionamiento**

El VDF CUE de la marca Grundfos tiene 4 diferentes modos de funcionamiento que se ajustan en el panel de control que son:

- Normal: La bomba funciona el modo de control seleccionado.
- Parada: La bomba se ha parado.
- Mínimo: La bomba funciona a velocidad mínima
- Máximo: La bomba funciona a velocidad máxima

### **2.13.4. Modos de control**

Los modos de control se establecen en el panel de control y es como va a trabajar la bomba para alcanzar el parámetro escogido, y hay 2 modos de control básicos:

### Funcionamiento no controlado (bucle abierto)

La curva es constante, la velocidad se mantiene en un valor ajustado entre la curva mínima y máxima, el punto de ajuste u operación se fija en valor de velocidad requerida. Este tipo control es usado al no tener sensores conectados en la bomba. En la Figura 2.17 se observa la curva de ADT de color más oscura puede variar sus revoluciones o frecuencia hacia arriba con dirección a la curva máxima o hacia abajo en dirección a la curva mínima.

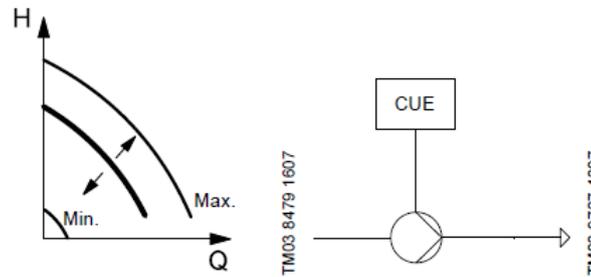


Figura 2.17: Diagrama de funcionamiento a curva constante

Fuente: Grundfos (nd)

### Funcionamiento controlado (bucle cerrado)

Para el funcionamiento de bucle cerrado es necesario el uso de controladores como sensores de presión, existen diversos funcionamientos controlados, pero se mencionan los 3 más usados en los sistemas de riego.

**Presión constante** La presión de salida se mantiene constante independientemente del caudal, la bomba se controla con una presión constante medida después de la bomba, esto quiere decir que la bomba ofrece una presión constante a lo largo del rango del caudal de 0 a  $Q_{m\acute{a}x}$ . En la Figura 2.18 se observa este tipo de funcionamiento.

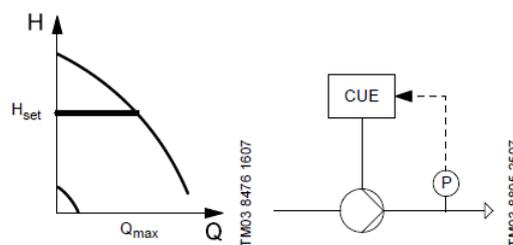
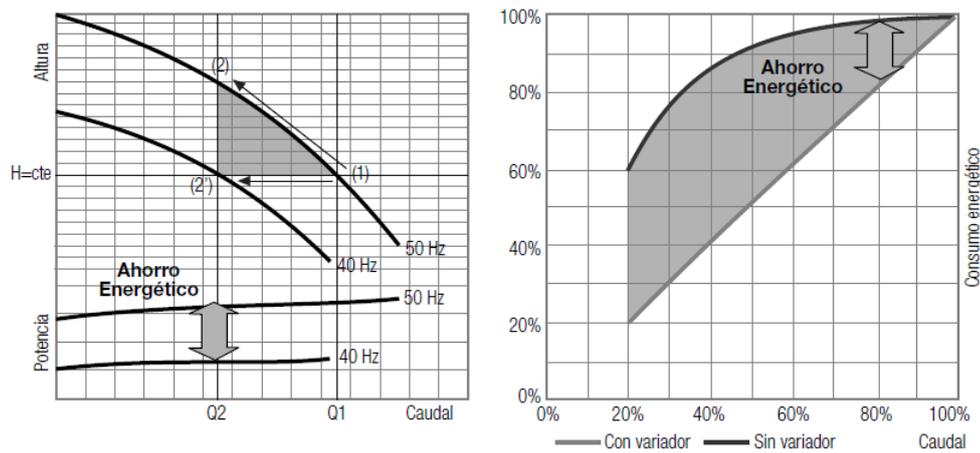


Figura 2.18: Diagrama de funcionamiento a presión constante

Fuente: Grundfos (nd)

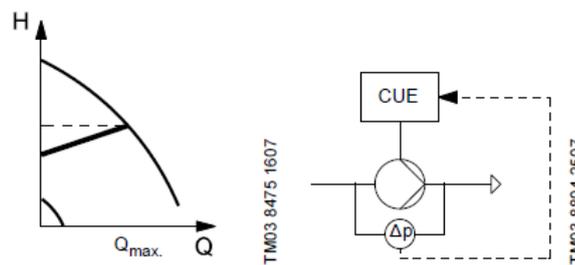
Para ver los ahorros energéticos para este tipo de sistema vemos en la Figura 2.19, que con el variador de frecuencia se pasa de un punto de trabajo (1) a (2) cuando el caudal cambia de un Q1 a otro Q2 funcionando a velocidad de 50 Hz, con un variador de frecuencia se pasa de suministrar el caudal Q2 reduciendo la velocidad a 40 Hz a un caudal en el punto de trabajo (2') manteniendo la presión constante y reduciendo la potencia consumida.



**Figura 2.19: Diagrama de variación de velocidad y curva de potencia con variación de velocidad**

**Fuente: Chavez (2014)**

**Presión diferencial proporcional** La presión diferencial de la bomba se reduce al disminuir el caudal y aumenta al aumentar el caudal. La bomba se controla de acuerdo con una presión diferencial medida a través de la bomba, este sistema ofrece un diferencial de presión a lo largo del caudal de 0 a  $Q_{\max}$ . En el Figura 2.20 se observa este tipo de funcionamiento por la línea inclinada en el diagrama de ADT.



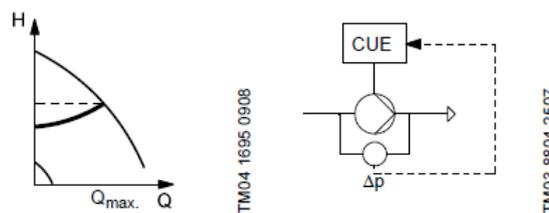
**Figura 2.20: Diagrama de funcionamiento a presión diferencial proporcional**

**Fuente: Grundfos (nd)**

La presión diferencial proporcional se puede seleccionar con una de estas dependencias de flujo:

- lineal (predeterminado)
- cuadrático

Cuando se selecciona la dependencia de flujo cuadrática, la presión diferencial de la bomba se reduce con una curva parabólica a un caudal descendente y aumenta a un caudal ascendente, en la Figura 2.21 se observa el diagrama de funcionamiento a presión diferencial proporcional.



**Figura 2.21: Diagrama de funcionamiento a presión diferencial proporcional, curva parabólica**

**Fuente: Grundfos (nd)**

## **2.14. Escenarios que se presentan en el sistema de riego por turnos**

En los sistemas de riego es frecuente operar con una sola bomba para diferentes rangos de caudales y alturas dinámicas totales, las bombas son de gran tamaño porque son diseñadas para la máxima necesidades y como resultado habrá varios periodos donde trabajen fuera del rendimiento máximo y lleven a un mayor consumo de energía y un menor tiempo de vida de la bomba. La solución para este problema es el uso de variadores de frecuencia para el ahorro de energía, el uso de estos se presenta en tres categorías básicas (ATECYR, 2012).

- Caudal constante/altura dinámica total variable
- Caudal variable/altura dinámica total constante
- Caudal variable/altura dinámica total variable

### **2.14.1. Caudal constante/altura dinámica total variable**

Para Q constante y ADT variable, el uso del variador de frecuencia es usado al tener áreas de turnos iguales y tuberías de menores dimensiones, en la Figura 2.22 se muestran tres puntos

de operación para tres turnos de riego y la curva de la bomba.

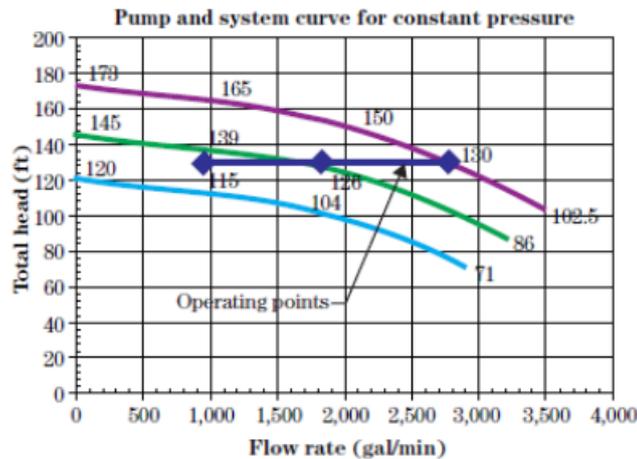


Figura 2.22: Escenario de turnos de Q variable y ADT constante

Fuente: USDA (2014)

### 2.14.2. Caudal variable/altura dinámica total constante

Para Q variable y ADT constante, el uso del variador de frecuencia es usado al tener áreas de turnos diferentes y tuberías de gran dimensión, en la Figura 2.23 se muestran tres puntos de operación para tres turnos de riego y la curva de la bomba.

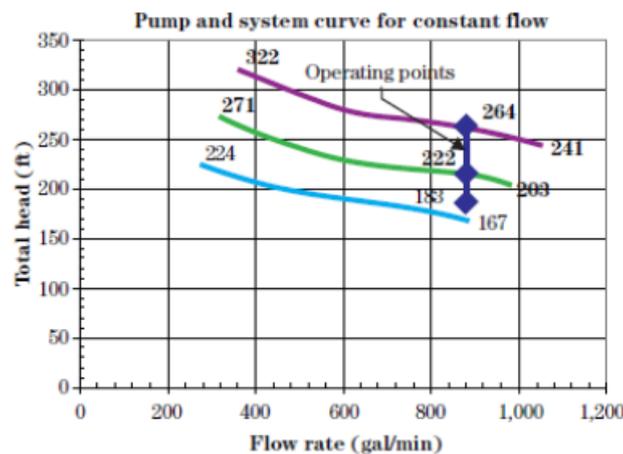


Figura 2.23: Escenario de turnos de Q constante y ADT variable

Fuente: USDA (2014)

### 2.14.3. Caudal variable/altura dinámica total variable

Para Q variable y ADT variable, el uso del variador de frecuencia es usado al tener áreas de turnos diferentes y tuberías de menores dimensiones, en la Figura 2.24 se muestran tres

puntos de operación para tres turnos de riego y la curva de la bomba para un sistema.

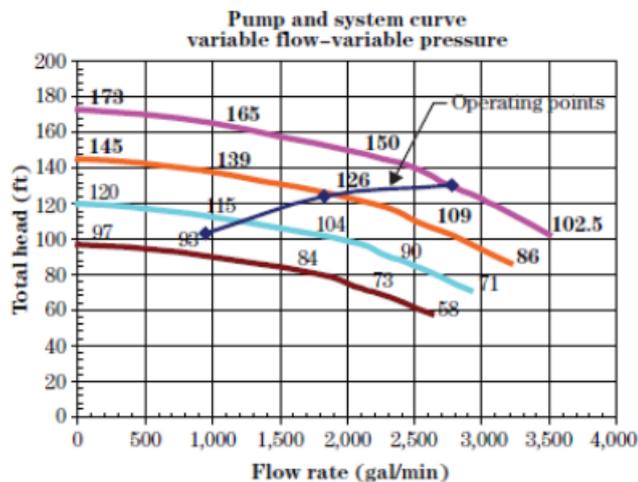


Figura 2.24: Escenario de turnos de Q y ADT variable

Fuente: USDA (2014)

## 2.15. Gases de efecto invernadero

Al tener una mayor eficiencia energética en el sistema de riego se tendrá menores gases de efecto invernadero y menor calentamiento global, pero como mediremos todos los gases del efecto invernadero, esto será posible con el dióxido de carbono equivalente.

El efecto invernadero es un fenómeno natural que permite al planeta mantener las condiciones necesarias para albergar vida, la atmósfera captura algunos de los rayos del sol. En esta existen diferentes tipos de gases, el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nítrico (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), son los que tienen mayores incidencias en el efecto invernadero. Al aumentar estos gases por obra del hombre por la quema de petróleo, carbón y gas natural, aumenta la temperatura, desertificación, deshielos, etc.

El gasto de energía es el principal factor para la contribución de gases de efecto invernadero, esto contribuye al cambio climático global, existen políticas para la reducción de emisiones de GEI como el acuerdo de París. Del total de emisiones el 26 % proviene de la electricidad fuente de consumo de los sistemas de riego modernos principalmente por las estaciones de bombeo.

Una medida para para evaluar los impactos de los gases del efecto invernadero es el dióxido de carbono equivalente de la emisión de los distintos gases. Los equivalentes del dióxido de carbono (CO2 equivalente) brindan un parámetro de medición universal (AISO, 2018).

## 2.16. Emisiones de $CO_2$

Las emisiones de CO2 producidas por el consumo energético del sistema de riego se pueden determinar a partir del consumo eléctrico en kWh. Para calcular las emisiones de CO2 es necesario tener un factor de emisión(fe) de este gas atribuido al suministro eléctrico, que representa las emisiones a la generación eléctrica conectada a la red nacional (CO2/kWh).

Teniendo las medidas de ahorro para aumentar la eficiencia energética podemos tener un menor consumo de energía que se traduce a menores emisiones de CO2 (GCCICC, 2011).

En la Tabla 2.5, nos muestra los factores de emisión de Perú en unidades de kgCO2 por consumo de energía, para uso de energía eléctrica es 0.615 kgCO2/kWh.

**Tabla 2.5: Factores de emisión de kgCO2**

	Factor	Unidades
Energía eléctrica	0.615	kgCO2/kWh
GLP	2.75	kgCO2/kilogramo
Disél	9.7	kgCO2/galón
Gasolina	7.9	kgCO2/galón
Leña	1.7	kgCO2/kilogramo

Fuente: Informativa (nd)

## 2.17. Contribución Nacional del Perú para mitigar los gases de efecto invernadero

La iNDC peruana que contempla una reducción del 30 % respecto a emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2030, los sectores que han sido identificados para mitigar

los gases son : Energía, Transporte, Procesos Industriales, Agricultura, Desechos, y Uso del Suelo, Cambio en el Uso del Suelo y Silvicultura (USCUSS), una de las opciones de mitigación consideradas en el sector de Energía es la optimización de motores(tecnología VSD) es decir el uso de variadores de frecuencia en motores lo que mitigaría para el año 2030 un valor de 0.049 MtCO<sub>2</sub>eq este valor se muestra en la Tabla 2.6, y el código del nombre de la iniciativa es E11.

**Tabla 2.6: Opciones de mitigación consideradas en el sector de Energía**

Código	Sector	Nombre de iniciativa	Mitigación MtCO <sub>2</sub> eq en 2030
E1	Energía	Combinación de energías renovables	2.101
E2	Energía	Generación Distribuida con Paneles Solares	0.041
E3	Energía	Electrificación Rural con Paneles Solares	0.046
E4	Energía	Interconexión Eléctrica con Ecuador	0.057
E5	Energía	Reducción de Pérdidas en el SEIN	0.886
E6	Energía	Cogeneración en Refinerías	0.598
E7	Energía	Cogeneración en Industrias	0.079
E8	Energía	Cogeneración en Servicios Hospitalarios	0.713
E9	Energía	Calentadores Solares de Agua en Viviendas	0.028
E10	Energía	Reemplazo de Motores por Antigüedad	0.108
E11	Energía	Optimización de Motores (tecnología VSD)	0.049
E12	Energía	Optimización de Calderas (buenas prácticas)	0.187
E13	Energía	Reemplazo Calderas por Antigüedad	0.116
E14	Energía	Reemplazo de Lámparas Incandescentes en Viviendas	0.150
E15	Energía	Reemplazo de Lámparas Fluorescentes en Viviendas	0.133
E16	Energía	Reemplazo de Lámparas Fluorescentes en sector comercial	0.081
E17	Energía	Reemplazo de Luminarias en Alumbrado Público	0.188
E18	Energía	Etiquetado en Eficiencia Energética en equipos y electrodomésticos	0.335
E19	Energía	Sistema de Gestión Integral de Energía en Industrias y Servicios	2.324
E20	Energía	Reducción uso de combustibles LT Iquitos	0.283
E21	Energía	Cocinas Mejoradas	1.120
E22	Energía	Reemplazo de fluorescente público	0.034
E23	Energía	Redes Eléctricas inteligentes (Smart Grid)	0.057
E24	Energía	Eficiencia en nuevas edificaciones (NAMA)	0.617
E25	Energía	Eficiencia Energética en Ladrilleras (NAMA)	0.730

Fuente: MINAM (2016)

## **2.18. El cultivo de la palta**

### **2.18.1. Generalidades del cultivo**

La palta (*Persea americana* Miller) pertenece a la familia de las Lauraceas y de genero *Persea*, se cultiva en diversas regiones tropicales y subtropicales del mundo, es de suma importancia en la alimentación humana pues tiene alto contenido de proteínas, vitaminas y minerales. Tiene tres razas: la mexicana, la guatemalteca y la antillana y diferentes variedades como la Hass, Fuerte, Lamh Hass, Mendez Hass, Bacón entre otras (Herrera and Narrea, 2011).

### **2.18.2. Generalidades del cultivo**

A causa que el Perú posee una diversidad de clima, la palta se puede producir durante todo el año, más su mayor porcentaje de producción se da en los meses de Abril a Julio con un concentrado de 56.3 %, el Perú produce principalmente dos variedades de palta la Hass y Fuerte que son una mezcla entre la guatemalteca y la mexicana.

La palta fuerte se produce casi todo el año, y su cosecha se da entre Marzo a Agosto, y su producción va más para el mercado interno; por el contrario, la cosecha de la palta Hass es entre marzo a setiembre, y casi la totalidad de su producción está destinada al mercado de exportación.

### **2.18.3. Manejo agronómico**

#### **Suelo y clima**

La palta (*Persea americana* Miller) pertenece a la familia de las Lauraceas y de genero *Persea*, se cultiva en diversas regiones tropicales y subtropicales del mundo, es de suma importancia en la alimentación humana pues tiene alto contenido de proteínas, vitaminas y minerales. Tiene tres razas: la mexicana, la guatemalteca y la antillana y diferentes variedades como la Hass, Fuerte, Lamh Hass, Mendez Hass, Bacón entre otras (Herrera and Narrea, 2011).

## Riego

El agua de riego es un factor importante se tiene que tener disponibilidad de agua permanente pues necesitan agua durante el proceso de floración y cuaja, los primeros 100 días post cuajado para que no se afecte su producción.

En campos de producción adulta se recomienda líneas de gotero de 2 litros /hora cada una, el consumo anual del palto en sistemas de riego por gravedad es de 12000 m<sup>3</sup> de agua por hectárea y por goteo 8000 m<sup>3</sup> por hectárea al año (Herrera and Narrea, 2012).

### 2.18.4. Producción, rendimiento y precio

Actualmente hay 500 variedades de paltas en el mundo, pero la más comercial es la variedad Hass, en el Tabla 2.7, vemos la producción mundial de palta del año 2007 hasta el año 2017, donde el Perú se ubica en el tercer puesto presentando la tasa más elevada de crecimiento en su producción con un 14,4 % de promedio por año.

**Tabla 2.7: Producción mundial de paltas**

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Total	3683499	3533621	4002687	3974144	4266261	4513854	4744937	5153462	5411602	5737522	6048508
México	1142892	1162429	1230973	1107135	1264141	1316104	1467837	1520695	1644226	1889354	2029886
Rep Dominicana	183468	188139	184357	285590	295081	290011	387546	513961	526438	601349	637688
Perú	121720	136303	157415	184370	213662	268525	288387	349317	367110	455394	466758
Indonesia	201635	244215	257642	224278	275953	294200	289901	307326	382530	304938	363157
Colombia	193996	183968	189029	205443	215089	255384	294997	288739	309852	294389	314275
Brasil	154096	147214	139089	153189	160376	159903	157482	156699	180652	196422	213041
Kenya	93639	103523	145204	202294	149241	166948	177799	218692	136420	176045	194279
Venezuela	83304	71771	68701	83618	107301	116964	112670	121576	128601	130290	133922
Chile	209645	122633	232202	166382	156247	160000	165000	160000	148459	140558	133636
EE.UU.	193100	105230	270813	158150	205432	238495	166106	179124	207750	124860	132730
Otros países	1106004	1068196	1127262	1203695	1223738	1247320	1237212	1337333	1379564	1423923	1429136

Fuente: Romero (2019)

En el Tabla 2.8, observamos la evolución de la, superficie cosechada, producción y rendimiento de la palta desde el año 2015 hasta el 2019, incrementando este de 11.1 ton/ha a 13 ton/ha.

**Tabla 2.8: Superficie cosechada, producción y rendimiento de la palta**

	2015	2016	2017	2018	2019	CAGR
Superficie cosechada (ha)	33989	37871	39629	40124	41306	4.0 %
Producción (ton)	376602	455394	466796	504532	535911	7.3 %
Rendimiento (ton/ha)	11.1	12.0	11.8	12.6	13	3.2 %

Fuente: MINAGRI (2019)

El precio de la palta en enero es de 6 soles el kilo en el Gran Mercado Mayorista de Lima, donde se comercializa diferentes variedades como: palta fuerte, criolla, Hass, antillana, en los meses de febrero a junio el precio vario entre los 3 a 4 soles por kilo de palta.

# III. METODOLOGÍA

## 3.1. Ubicación y extensión

### 3.1.1. Ubicación política

- País: Perú
- Departamento: Lima
- Provincia: Lima
- Distrito: La Molina
- Fundo: Programa de Investigación y Proyección Social en Frutales y Fundo -Universidad Nacional Agraria La Molina.

### 3.1.2. Ubicación geográfica

El proyecto se encuentra en el Fundo agrícola, en el interior de la UNALM, ubicado en el distrito de la Molina, provincia Lima, región Lima, Perú (Figura 3.1). La cual tiene un de área 18 ha y actualmente se siembra camote, papa y maíz:

- Longitud: 76°57'10.74.º
- Latitud: 12°4'50.47"S
- Altitud: 245 msnm



### 3.3. Metodología

A continuación, en la Figura 3.2 se presenta el diagrama de flujo de la metodología, considerando que los escenarios propuestos se compararan para los mismos datos básicos: variables climáticas, cultivo, oferta de agua, tipo de suelo, energía eléctrica y área.

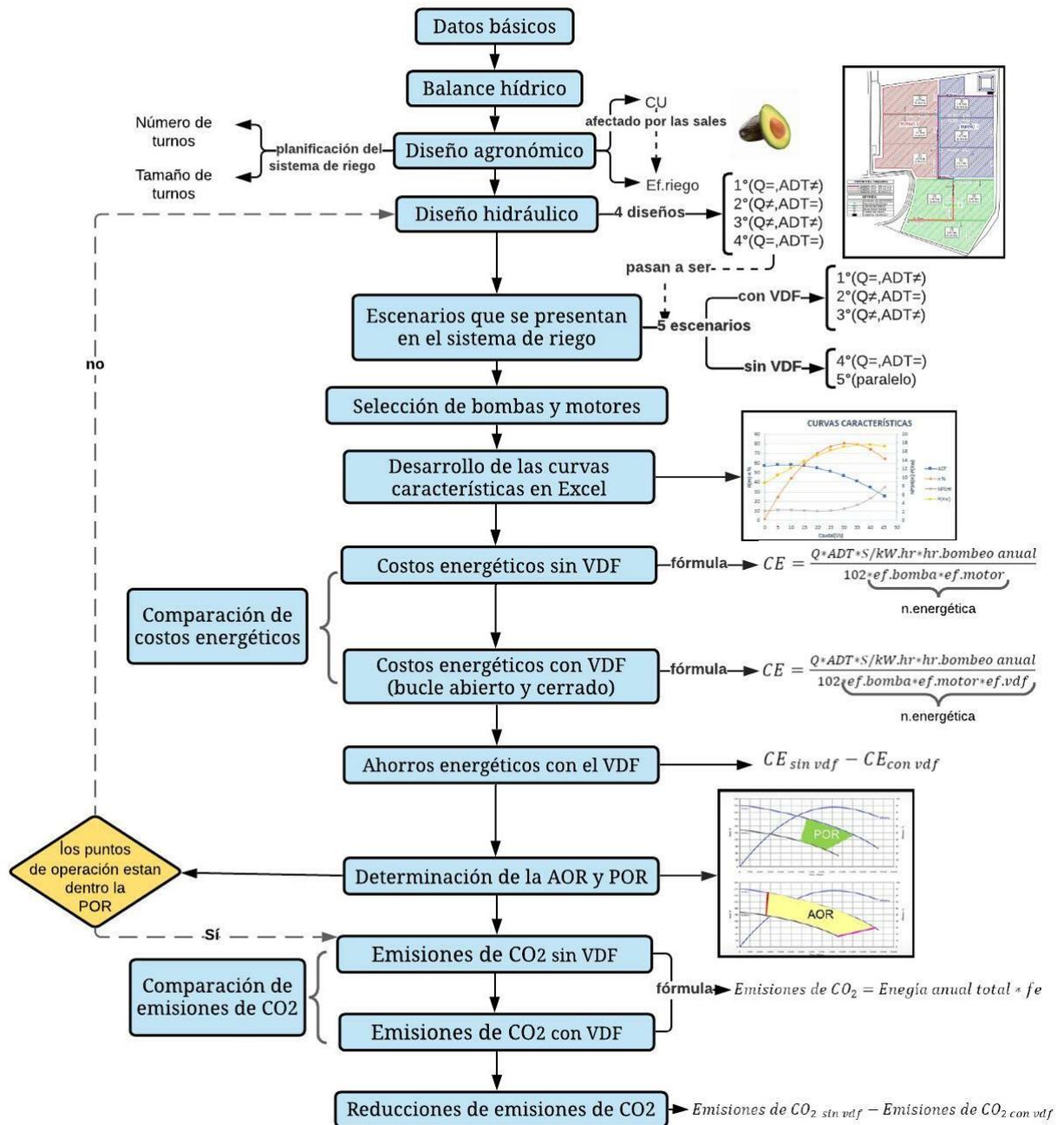


Figura 3.2: Diagrama de flujo de la metodología

### 3.3.1. Datos básicos

Para el diseño del sistema de riego se necesitó los siguientes datos básicos:

#### Topografía

Con la estación total se realizó el levantamiento topográfico para poder realizar el plano topográfico del Fundo, estos datos fueron procesados con el software Civil3D.

#### Características climáticas

Se utilizó los datos climáticos de la estación Alexander Von Humboldt, ubicada en la UNALM, para obtener las climatologías para un periodo de 15 años (1994-2010), el resumen se presenta en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1: Climatología observada de la estación Alexander Von Humboldt 1994-2010**

Mes	Tn (°C)	Tx (°C)	Hr (%)	Vv (m/s)	Hs (horas)
Enero	19.4	27.4	80	1.3	5.3
Febrero	20.3	28.9	76	1.3	6
Marzo	19.8	28.7	76	1.2	7
Abril	17.8	26.9	79	1.1	7.6
Mayo	15.5	23.3	83	0.9	5.6
Junio	14.2	19.9	88	0.8	2.7
Julio	14.2	18.9	89	0.8	2
Agosto	13.9	18.3	89	0.9	2.4
Septiembre	14	20	88	1	3.2
Octubre	14.5	21.2	86	1.1	4.4
Noviembre	15.7	22.7	84	1.1	5
Diciembre	17.4	25.1	83	1.1	4.9
Promedio	16.4	23.4	83	1.1	4.7

Fuente: Observatorio "Alexander Von Humboldt" UNALM

### **Características del suelo**

Se tomaron muestras de suelos a diferentes profundidades de 0-30 cm, de 30-60 cm en el campo Guayabo 1 -UNALM, pertenece al Campo Agrícola Experimental (Fundo agrícola), los resultados del análisis de suelo, salinidad y sodicidad, elementos pesados y parámetros hídricos a diferentes profundidades.

### **Características del agua**

Se tomo muestras de agua en los canales bajos y altos, estas fueron enviadas al Laboratorio de Análisis de Agua y suelo del Departamento de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola para un análisis de agua de rutina, este se encuentra detallado en el Anexo 1.

### **3.3.2. Cálculo del balance hídrico**

Se calculó la oferta y la demanda de agua para determinar si el agua que se necesita fuera lo suficiente para los cultivos por medio del balance hídrico a nivel anual, mensual y por turnos de riego.

### **3.3.3. Diseño agronómico**

Se calculó la oferta y la demanda de agua para determinar si el agua que se necesita fuera lo suficiente para los cultivos por medio del balance hídrico a nivel anual, mensual y por turnos de riego.

- Cálculo de la evapotranspiración (Etc)
- Área mojada ( $A_m$ )
- Espaciamiento entre emisores ( $S_e$ )
- Coeficiente de uniformidad ( $C_u$ )
- Eficiencia de riego (Ef. riego)
- Lámina neta ( $L_n$ )
- Lámina bruta ( $L_b$ )

- Frecuencia de riego (Fr)
- Tiempo de riego (Tr)
- Velocidad de aplicación (V)
- Capacidad preliminar del sistema (Q)
- Número de turnos
- Tamaño de turnos preliminares

### **3.3.4. Diseño hidráulico**

Esta etapa fue realizada después del diseño agronómico, donde se efectuó el diseño de los laterales, portlaterales y pérdidas de carga en las subunidades y turnos de riego los programas que se usaron fue el AutoCAD para realizar la distribución de las unidades de riego y para los cálculos hidráulicos el Excel. En todos los diseños se usó el gotero autocompensante Azud Premier PC AS de 1.9 l/s.

Los diseños presentados son los más comunes en los campos agrícolas. Los tres primeros diseños fueron realizados para el uso del variador de frecuencia para esto se tuvo que tener diferentes condiciones de caudal y altura dinámica total y uno adicional que es el cuarto diseño que fue realizado con el fin de no usar el variador de frecuencia con iguales condiciones de caudal y altura dinámica total. A continuación, se detallan los objetivos para los cuatro diseños.

#### **Caudales constantes y alturas dinámicas totales variables por turno de riego**

La finalidad del primer diseño fue tener caudales constantes y alturas dinámicas totales variables, para conseguir que los caudales de los turnos sean constantes cada turno de riego tuvo que tener la misma área y con relación a la altura dinámica total variable de los turnos se usaron diámetros de tuberías que cumplan exactamente con la condición de velocidad máxima permisible.

### **Caudales variables y alturas dinámicas totales constantes por turno de riego**

La finalidad del segundo diseño fue tener caudales variables y alturas dinámicas totales constantes, para conseguir que las alturas dinámicas totales de los turnos sean constantes se tuvieron en consideración dos factores: el primero fue usar mayores diámetros de tuberías para tener mínimas pérdidas de carga y el segundo que las longitudes de los laterales fueran similares o de igual dimensión, con respecto a los caudales variables las áreas de los turnos tuvieron que ser diferentes.

### **Caudales y alturas dinámicas totales variables por turno de riego**

La finalidad del tercer diseño fue tener caudales y alturas dinámicas variables, para conseguir que los caudales fueran variables las áreas de los turnos tuvieron que ser diferentes y en la relación a la presión variable de los turnos se usaron diámetros de tuberías que cumplan exactamente con la condición de velocidad máxima permisible.

### **Caudales y alturas dinámicas totales constantes por turno de riego**

La finalidad del cuarto diseño fue tener caudales y alturas dinámicas totales constantes, para conseguir que los caudales de los turnos sean constantes cada turno de riego tuvo que tener la misma área y para presiones constantes de los turnos se tuvieron en consideración dos factores: el primero fue usar mayores diámetros de tuberías para tener mínimas pérdidas de carga y el segundo que las longitudes de los laterales fueran similares o de igual dimensión.

Se usó la misma distribución de turnos que el primer diseño, teniendo las mismas áreas para cada turno de riego, sin embargo, las subunidades para cada subunidad aumentaron con el fin de tener ADT iguales.

La metodología para el cálculo hidráulico fue la siguiente:

#### **Diseño hidráulico de la subunidad**

- Diseño hidráulico del lateral
- Diseño hidráulico de portalateral

- Diseño y caudal de la subunidad
- Diseño de arco de riego

### **Diseño de matriz**

Utilizando el criterio de velocidad máxima permisible, para la selección de redes de tuberías, se usó como velocidad máxima 2m/s, en cada punto de riego se colocaron letras o números hasta llegar al cabezal.

### **Diseño del cabezal**

Para el diseño del cabezal se realizó estudios del origen y calidad del agua para saber la cantidad y configuración del filtro, además se usará filtro autolimpiantes (filtro low cost energy), que requiere baja presión para trabajar y poca cantidad de agua , para el equipo de inyección de fertilizantes se usó el inyector tipo Venturi acoplado a una bomba y se seleccionaron los elementos de control y medida como válvulas hidráulicas, reguladores de presión, caudalímetros, manómetros, válvulas de aire, entre otras. Además, se tendrá que determinar la pérdida de carga para cada elemento mencionado la cual se encuentra en la ficha técnica.

### **Puntos de operación de la bomba**

Teniendo el caudal de cada subunidad de riego se obtuvo el caudal total para cada turno y la ADT (altura dinámica total) fue la suma de:

- Presión en la subunidad: Es la presión del portalateral con la pérdida de carga de los laterales
- Pérdida de carga en el arco de riego: Por las pérdidas de carga en válvulas hidráulicas, reductores, tee, codo, entre otros.
- Pérdida de carga en la matriz: Es la pérdida de carga por fricción y se calculó con la ecuación de Hazen-Williams.
- Pérdida de carga en accesorios: Es el 10 % de la pérdida de carga de la matriz
- Pérdida de carga en el cabezal: Un valor constante de 8 metro

- Pérdida topográfica: Es la diferencia de cota de la válvula con la entrada del reservorio, es negativo si la pendiente está a favor y es positivo si la pendiente está en contra.
- Profundidad del reservorio: Un valor constante de 7.5 metros
- Factor de seguridad: Es el 10 % de la suma de presión en la subunidad, pérdida de carga en el arco de riego, pérdida en accesiones y pérdida en el cabezal de riego.

### **3.3.5. Escenarios que se presentan en el sistema de riego**

En un sistema de riego es frecuente tener diferentes condiciones de Q y ADT debido al diseño hidráulico que se maneje.

Los cuatro diseños hidráulicos pasaron a ser los escenarios para el sistema de riego por goteo del Fundo agrícola, en total fueron cinco escenarios, en los tres primeros escenarios se usó variador de frecuencia por tener Q y ADT variables para el cuarto y quinto escenario no fue necesario el uso de variador de frecuencia pues el cuarto escenario se realizó para Q y ADT constantes y el quinto escenario tuvo una configuración en paralelo, a continuación, se especifica cada escenario.

#### **Primer escenario (Caudal constantes/altura dinámica total variable)**

Para el primer escenario, se usó el primer diseño hidráulico donde los Q eran constantes y las ADT eran variables, al tener diferencias en las alturas dinámicas totales se usó un variador de frecuencia para tener ahorros energéticos y menores emisiones de  $CO_2$ .

#### **Segundo escenario (Caudal variable/altura dinámica total constante)**

Para el segundo escenario, se usó el segundo diseño hidráulico donde los Q eran variables y las ADT eran constantes, al tener diferencias en los caudales se usó un variador de frecuencia para ahorros energéticos y menores emisiones de  $CO_2$ .

#### **Tercer escenario (Caudal variable/altura dinámica total variable)**

Para el tercer escenario, se usó el tercer diseño hidráulico donde los Q y ADT eran variables, al tener diferencias en las alturas dinámicas totales y caudales se usó un variador de

frecuencia para ahorros energéticos y menores emisiones de  $CO_2$ .

#### **Cuarto escenario (Caudal contantes/altura dinámica total constante)**

Para el cuarto escenario, se usó el cuarto diseño hidráulico donde los Q y ADT eran constantes, al tener valores de presiones y caudales constantes el uso del variador de frecuencia no fue necesario.

#### **Quinto escenario (Bombas en paralelo)**

Para el quinto escenario, se usó el segundo diseño hidráulico donde los Q eran variables y las ADT eran constantes. Se usó dos bombas iguales en una configuración de paralelo por lo cual los caudales del segundo escenario fueron divididos en dos y las ADT permanecieron constantes, para este escenario no se usó variador de frecuencia.

### **3.3.6. Selección de motores y bombas**

Con los requerimientos máximos de Q y ADT de los tres turnos se procedió a escoger la bomba con mayor eficiencia para cada escenario.

Para la selección de bombas, se usaron las bombas Grundfos, por tener altas eficiencias energéticas en clase mundial lo que se traduce a altas eficiencias en los motores de IE3/IE4 que cumplen con la norma IEC 60034-30-1, estas son capaces de producir caudales de hasta 180m<sup>3</sup>/h y una altura de hasta 280 metros y tienen un rango de motor de 0.37 a 75 kW.

En la página de Grundfos, se encontró una aplicación de selección rápida donde se colocó el Q y ADT máxima de los turnos y nos seleccionó diferentes tipos de bombas.

Al tener la bomba seleccionada el programa nos presentó las cuatro curvas características de la bomba (ADT, n, P y NPSHr), además brindó la gráfica del motor donde se visualiza la potencia de la bomba (P2), el factor de potencia, eficiencia del motor, intensidad del motor y la potencia del motor (P1).

### 3.3.7. Desarrollo de las curvas características para cada escenario

Para obtener la ecuación de la curva altura dinámica total, potencia, eficiencia y altura neta positiva en la aspiración para los cinco escenarios se exportó los puntos de la ficha técnica a un Excel de las cuatro curvas características y se halló el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para conocer que bien se ajustó a cada curva.

Las ecuaciones tuvieron la siguiente forma:

- Caudal vs Altura dinámica total: Q (l/s) vs ADT (m)

$$ADT = aQ^2 + bQ + c \quad (3.1)$$

- Caudal vs Eficiencia: Q (l/s) vs  $\eta$  (%)

$$\eta = aQ^2 + bQ + c \quad (3.2)$$

- Caudal vs Potencia: Q (l/s) vs P (kW)

$$P = aQ^3 + bQ^2 + cQ + d \quad (3.3)$$

- Caudal vs Altura neta positiva en la aspiración: Q (l/s) vs NPSHr (m)

$$NPSHr = aQ^3 + bQ^2 + cQ + d \quad (3.4)$$

Con las ecuaciones de cada curva se obtuvieron los puntos de cada curva de: ADT,  $\eta$ , P y NPSHr que van a la velocidad de 50 Hz y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para conocer que bien se ajustó a cada curva y después se unió las cuatro curvas características a una sola gráfica.

Para el quinto escenario las curvas características fueron iguales para la primera y segunda bomba, después se procedió a sacar las curvas características en la configuración en paralelo con las leyes fundamentales del comportamiento hidráulico.

### 3.3.8. Costos energéticos para el modo de control por estrangulación

Este tipo de control es usado por medio de una válvula de regulación, la cual ajusta el punto de operación que son los mismos requerimientos de Q pero con diferentes ADT porque se ajustan a la curva de 50 Hz. Se realizó el modo de control por estrangulación para tener una comparación en el ahorro energético y reducciones de emisiones de  $CO_2$  con y sin un VDF.

Se calcularon los costos energéticos para los cinco escenarios sin importan si era necesario o no el uso del VDF, el cálculo del costo energético es la multiplicación de las horas de bombeo, costo del kilowatt hora y potencia de la red (Ecuación 3.5).

$$CE = PR \times S/kW.hora \times hba \quad (3.5)$$

Donde:

CE: costo energético (S/. año)

PR: potencia de la red (kW)

hba: horas de bombeo anual (hora)

Primero se calculó las horas de bombeo por mes con el volumen demandado y los caudales respectivos de cada turno de riego, la suma de los doce meses nos resultó las horas de operación de bombeo anual, pero al tener tres turnos de riego se tuvo que multiplicar por el porcentaje de área de cada turno para tener así las horas de bombeo anual para cada turno de riego, las áreas tuvieron que estar en hectáreas.

Segundo se averiguó el costo de kW/hora de Perú que es de S/. 0.275 (ENEL, 2021).

Tercero se calculó la potencia de red (Ecuación 3.6) para lo cual se necesitó de los datos de caudal, altura dinámica total, eficiencia de la bomba de cada turno de riego y la eficiencia del motor que fue constante para los tres turnos de riego y se sacó de la ficha técnica del motor.

$$PR = \frac{Q \times ADT}{102 \times \eta_{bomba} \times \eta_{motor}} \quad (3.6)$$

Donde

Q: caudal (l/s)

ADT: altura dinámica total o presión (m)

$\eta_{bomba}$ : eficiencia de la bomba (decimales)

$\eta_{motor}$ : eficiencia del motor (decimales)

Cuarto se sumó los costos energéticos de cada turno y se obtuvo el costo energético total para cada escenario.

Con los puntos de operación de la curva 50 Hz se graficó la curva del sistema (Ecuación 3.7).

$$H = K \times Q^2 \quad (3.7)$$

Donde

H: ADT (m)

Q: caudal (l/s)

K: coeficiente de resistividad de la tubería

Por último, se calculó la eficiencia energética con los datos de eficiencia de la bomba y eficiencia del motor con la Ecuación 3.8.

$$\eta_{energtica} = \frac{\eta_{bomba} \times \eta_{motor}}{100} \quad (3.8)$$

Donde

$\eta_{energtica}$ : eficiencia energética (decimales)

$\eta_{bomba}$ : eficiencia de la bomba (decimales)

$\eta_{motor}$ : eficiencia del motor (decimales)

### **3.3.9. Costos energéticos para modo del control con el VDF**

Para mayores ahorros de energía se usó el VDF que cambia la velocidad del motor para diferentes puntos de operación que son los requerimientos iniciales de Q y ADT, el VDF proporciona dos modos de control, bucle abierto y cerrado por lo cual fueron usados en la siguiente investigación.

#### **Bucle abierto**

Este tipo de modo de control se utilizó para el primer, segundo y tercer escenario por tener diferentes Q y ADT.

Los tres escenarios fueron controlados por medio de una operación fija para el valor de velocidad que requería el punto de operación, no se utilizó sensores de presión en la bomba en este tipo de operación. Cada escenario tuvo tres puntos de operación y tres curvas características a diferentes velocidades, pero se añadió una curva más para la velocidad de 60 Hz por ser la más usada en Perú.

Para determinar los costos energéticos se siguió el siguiente procedimiento:

Primero, se determinó a que velocidad debe girar el motor con ayuda de las leyes de afinidad (Ecuación 2.18) que nos permitieron dar la velocidad de giro de tal manera que se ajuste al punto de operación determinado.

Segundo, se calculó el valor de eficiencia (Ecuación 3.9) pues no existe una ley de afinidad para la eficiencia, para esto se usó la ecuación de potencia porque al tener los datos de Q, ADT y P de las leyes de afinidad se pudo calcular la eficiencia de la bomba, cabe resaltar que también se volvió a calcular los valores de eficiencia con la ecuación para los datos de velocidad de 50 Hz para que la familia de eficiencia tuviera la misma tendencia.

$$\eta = \frac{Q \times ADT}{P \times 102} \times 100 \quad (3.9)$$

Donde

$\eta$ : eficiencia

Q: caudal (l/s)

ADT: altura dinámica total o presión (m)

P: Potencia (kW)

Tercero, se graficó la familia de curvas de eficiencia para cada velocidad requerida por los puntos de operación.

Cuarto, se presenta las ecuaciones de ADT, eficiencia y potencia para cada punto de operación.

Quinto, se calculó los costos energéticos de forma similar que el control por estrangulación añadiendo la eficiencia del variador en la fórmula de potencia de la red (Ecuación 3.10):

$$PR = \frac{Q \times ADT}{102 \times \eta_{bomba} \times \eta_{motor} \times \eta_{vdf}} \times 100 \quad (3.10)$$

Donde

PR: Potencia de la red

Q: caudal (l/s)

ADT: altura dinámica total o presión (m)

$\eta_{bomba}$ : eficiencia de la bomba

$\eta_{motor}$ : eficiencia del motor

$\eta_{vdf}$ : eficiencia del variador de frecuencia

Sexto, se sumó los costos energéticos de cada turno a diferentes velocidades y se obtuvo el costo energético total.

Por último, se calculó la eficiencia energética para todos los turnos de riego con los datos de eficiencia de la bomba, eficiencia del motor y eficiencia del variador de frecuencia con la Ecuación 3.11.

$$\eta = \frac{\eta_{bomba} \times \eta_{motor} \times \eta_{vdf}}{100} \times 100 \quad (3.11)$$

Donde

$\eta_{energetica}$ : eficiencia energética

$\eta_{bomba}$ : eficiencia de la bomba

$\eta_{motor}$ : eficiencia del motor

$\eta_{vdf}$ : eficiencia del variador de frecuencia

### **Bucle cerrado**

Este tipo de modo de control se utilizó para el segundo y tercer escenario donde se tuvieron diferentes Q y ADT.

Los dos escenarios fueron controlados por medio de una presión constante, presión proporcional lineal y presión proporcional cuadrática.

Para determinar los costos energéticos para los escenarios se utilizó la misma metodología que bucle abierto los valores de Q para los tres puntos de operación permanecieron constantes pero el valor de ADT cambió por el tipo de control que se utilice y para esto se siguió el siguiente procedimiento para cada una.

**Presión constante** Para determinar el ADT para presión constante se siguieron los siguientes pasos:

Primero, se halló la ecuación para presión constante que es lineal por lo que solo se necesitó de un punto en la recta el cual es el máximo valor de Q de los puntos de operación, este valor

fue reemplazado en la ecuación de ADT de 50 Hz y se obtuvo el ADT que es la presión constante para los diferentes caudales.

Se determinó la función lineal constante (Ecuación 3.12).

$$y = c \quad (3.12)$$

Segundo, se determinó los nuevos valores de ADT para los puntos de operación de la recta de presión constante que fueron “c”.

Tercero, se graficó las curvas de ADT de 50 Hz, las curvas de sistema, la recta de presión constante, los puntos de operación y los puntos de operación en la recta.

**Presión diferencial lineal** Para determinar el ADT para presión diferencial lineal se siguieron los siguientes pasos:

Primero, se halló la ecuación para presión diferencial lineal que es de primer grado por lo que se necesitó de dos puntos de la recta, el primer punto tiene el mismo valor de Q y ADT que el punto para presión constante y el segundo punto puede ser un punto de operación de los turnos de riego o la mitad de ADT del primer punto considerando un caudal de 0 l/s, esto dependió a cuál se ajusta mejor la recta lineal.

Se determinó la función polinómica de primer grado (Ecuación 3.13).

$$y = aX + b \quad (3.13)$$

Segundo, se determinó los nuevos valores de ADT para los puntos de la recta de presión diferencial lineal que fueron “ $a(Q) + b$ ”, donde Q es el caudal de cada turno de riego.

Tercero, se graficó las curvas de ADT de 50 Hz, las curvas de sistema, la recta de presión

diferencial lineal, los puntos de operación y los puntos de operación de la recta.

**Presión diferencial cuadrática** Para determinar el ADT para presión diferencial cuadrática se siguieron los siguientes pasos:

Primero, se halló la ecuación para presión diferencial cuadrática que es de segundo grado por lo que se necesitó de tres puntos de la curva, el primer punto tiene el mismo valor de Q y ADT que el punto para presión constante, el segundo punto es un punto de operación y el tercer punto puede ser otro punto de operación de los turnos de riego y si no es el caso se toma un valor tabulado que se ajuste a la curva.

Se determinó la función polinómica de segundo grado (Ecuación 3.14).

$$y = aX^2 + bX + c \quad (3.14)$$

Segundo, se determinó los nuevos valores de ADT para los puntos de la recta de presión diferencial cuadrática que fueron “ $a(Q)^2 + b(Q) + c$ ” donde Q es el caudal de cada turno de riego.

Tercero, se graficó las curvas de ADT de 50 Hz, las curvas de sistema, la recta de presión diferencial lineal, y se colocó los puntos operativos y los puntos operativos de la recta.

### **3.3.10. Determinación de la región de operación admitida y permitida**

Para determinar la región de operación admitida y permitida se separaron sin el uso del VDF es decir a una velocidad constante de 50 Hz y con el uso del VDF que es a velocidades variables donde se tendrán tres diferentes velocidades de giro del motor al tener tres puntos de operación.

#### **Región de operación admitida (AOR)**

La región de operación admitida solo fue hallada para velocidades constantes pues los límites de caudales se encontraban en la ficha técnica de la cada bomba. Para realizar la gráfica de AOR los caudales límites fueron colocados en la ecuación de la curva de ADT de 50 Hz que

nos proporcionó Grundfos y con la ecuación de ADT se obtuvo la presión para cada punto de operación.

### **Región de operación permitida (POR)**

La región de operación permitida fue hallada tanto para velocidad constante y velocidad variable para los cinco escenarios, se determinó la gráfica de POR con la práctica ANSI/HI 9.6.3.-2012 por lo cual se partió por conocer el caudal de máxima de eficiencia, que se calculó por medio de la ecuación de eficiencia (Ecuación 3.15).

$$\eta = aQ^2 + bQ + c \quad (3.15)$$

Al ser esta una ecuación cuadrática se procedió a utilizar la fórmula del vértice para hallar el máximo punto de la función usando la Ecuación 3.16.

$$x = -\frac{b}{2a} \quad (3.16)$$

Donde b y a son coeficientes del polinomio de la ecuación de eficiencia y “x” representa el valor del caudal de máxima eficiencia.

El ADT se halló con la ecuación de ADT para las diferentes velocidades y así se obtuvo el punto de máxima eficiencia ( $Q_{BEP}$ ). Con el punto de máxima eficiencia, se obtuvo los límites de la POR, multiplicando 120 % por  $Q_{BEP}$  y 70 % por  $Q_{BEP}$ .

### **3.3.11. Comparación de costos energéticos sin y con el uso de VDF**

Se comparó los costos sin el uso del VDF y con el uso de VDF para bucle abierto y bucle cerrado.

#### **Costos energéticos sin el uso de VDF**

Se comparó los costos energéticos sin el uso del VDF para los cinco escenarios.

### **Costos energéticos con el uso de VDF**

Se comparó los costos energéticos para el modo de control por bucle abierto y cerrado.

**Modo de control por bucle abierto** Se comparó los costos energéticos para el primer, segundo y tercer escenario.

**Modo de control por bucle cerrado** Se comparó los costos energéticos por el tipo de control: presión constante, presión diferencial lineal y presión diferencial cuadrática tanto para el segundo y tercer escenario.

### **3.3.12. Ahorros energéticos con el uso del VDF**

Al usar VDF se tuvo un ahorro de energía con respecto al uso de una válvula de regulación o sin el VDF, al tener dos modos de control los ahorros fueron distintos en valores.

#### **Modo de control por bucle abierto**

Se restaron los costos energéticos sin el uso del VDF y con el uso del VDF, para obtener los ahorros en costos energéticos tanto en soles por año y en porcentaje por año para el primer, segundo y tercer escenario.

Con los datos de ahorros energéticos y variadores de frecuencia para los tres escenarios se calculó el tiempo de recuperación de la inversión, que significa en cuanto tiempo se recuperara el dinero invertido en el VDF de forma lineal para esto se usó la Ecuación 3.17.

$$tr = \frac{\text{Precio VDF}}{\text{Ahorros en costos energéticos anuales}} \quad (3.17)$$

#### **Modo de control por bucle cerrado**

Se restaron los costos energéticos sin el uso del VDF y con el uso del VDF por el tipo de control: presión constante, presión diferencial lineal y presión diferencial cuadrática, para obtener los ahorros en costos energéticos tanto en soles por año y en porcentaje por año para el segundo y tercer escenario.

### **3.3.13. Emisiones de CO<sub>2</sub> sin el uso del VDF**

Para el cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub> se necesitó de los datos de potencia de la red y las horas de operación anual para obtener así la energía anual de cada turno de riego, la suma de los tres turnos es la energía anual total y multiplicado por el factor de energía eléctrica de 0.615 kgCO<sub>2</sub>/kWh de la red interconectada que se tomó del Ministerio del Ambiente se obtuvo las emisiones totales de dióxido de carbono, se calcularon las emisiones para los cinco escenarios.

### **3.3.14. Emisiones de CO<sub>2</sub> con el uso del VDF**

Se usó la misma metodología que la 3.3.16, para el modo de control por bucle abierto se calcularon las emisiones para el primer, segundo y tercer escenario, y para el modo de control por bucle cerrado para el segundo y tercer escenario con cada tipo de control: presión constante, presión diferencial lineal y presión diferencial cuadrática.

### **3.3.15. Comparación del CO<sub>2</sub> sin y con el uso del VDF**

#### **Emisiones de CO<sub>2</sub> sin el uso de VDF**

Se comparó las emisiones de CO<sub>2</sub> sin el uso del VDF para los cinco escenarios.

#### **Emisiones de CO<sub>2</sub> con el uso de VDF**

Se comparó las emisiones de CO<sub>2</sub> con el uso del VDF con el modo de control por bucle abierto los escenarios fueron: el primer, segundo y tercer y con el modo de control por bucle cerrado los escenarios fueron: el segundo y tercer para los diferentes modos de control: presión constante, presión diferencial lineal y presión diferencial cuadrática tanto para el segundo y tercer escenario.

### **3.3.16. Reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> por el uso del VDF**

Al usar VDF se tuvo una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> con respecto al usar una válvula de regulación o sin el uso del VDF.

### **Modo de control por bucle abierto**

Se restaron las emisiones de  $CO_2$  sin el uso del VDF y con el uso del VDF para obtener la reducción de emisiones de  $CO_2$  tanto en  $kgCO_2$  por año y en porcentaje por año para el primer, segundo y tercer escenario.

### **Modo de control por bucle cerrado**

Se restaron las emisiones de  $CO_2$  sin el uso del VDF y con el uso del VDF para el modo de control de bucle cerrado por el tipo de control: presión constante, presión diferencial lineal y presión diferencial cuadrática, para obtener la reducción de emisiones de  $CO_2$  tanto en  $kgCO_2$  por año y en porcentaje por año para el segundo y tercer escenario.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. Cálculo del balance hídrico

Para el balance hídrico fue necesario tener el volumen de agua de demanda y oferta, para esto fue necesario conocer los parámetros para su cálculo. Uno de estos es la Evapotranspiración potencial (Eto), se calculó la con el software CROPWAT 8.0, en la Tabla 4.1, se muestra el resultado de radiación solar (Rs) y Eto para todos los meses.

**Tabla 4.1: Climatología simulada de la radiación solar y Eto 1994-2010**

Mes	Rs (MJ/m <sup>2</sup> /día)	ETo (mm/día)
Enero	18.4	3.72
Febrero	19.4	4.11
Marzo	20.2	4.17
Abril	19.5	3.72
Mayo	14.9	2.65
Junio	10.4	1.8
Julio	9.8	1.68
Agosto	11.4	1.89
Septiembre	13.8	2.33
Octubre	16.6	2.83
Noviembre	17.8	3.15
Diciembre	17.7	3.32
Promedio	15.8	2.95

Se tomó los datos de la FAO para el cultivo aguacate sin cobertura de suelo un Kc para inicio de 0.6, medio de 0.85 y final de 0.75 además de la etapa de crecimiento del cultivo para árbo-

les frutales específicamente caducifolios, teniendo una etapa de inicio de 20 días, desarrollo de 70 días, mediados de 120 días y final de 60 días, además de la fecha de siembra que inicia en marzo.

En la Tabla 4.2, se muestra los valores de Kc ponderado para todos los meses del año, teniendo como máximo valor 0.85 y la lámina de neta anual es de 1053.78 mm/año del cultivo.

**Tabla 4.2: Valores de Eto mensual**

Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Kc ponderado	0.75	0.75	0.6	0.7	0.8	0.85	0.85	0.85	0.85	0.8	0.75	0.75	
Eto (mm/día)	4.11	4.17	3.72	2.65	1.8	1.68	1.89	2.33	2.83	3.15	3.32	2.95	
N° días	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	
Eto (mm/mes)	127.41	120.93	115.32	79.5	55.8	50.4	58.59	72.23	84.9	97.65	99.6	91.45	1053.78

#### 4.1.1. Oferta del agua

El agua se obtiene del canal de la UNALM, que trae 280 l/s. La disponibilidad de agua son los días lunes de cada semana y durante 10 hr, la oferta anual total tuvo un valor de 525600 m<sup>3</sup>, la oferta de agua mensual y semanal se muestra en los siguientes Tabla 4.3.

**Tabla 4.3: Oferta de agua para el Fundo agrícola**

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Caudal (l/s)	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	
N° días por mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	
Volumen agua (m <sup>3</sup> /mes)	44640	40320	44640	43200	44640	43200	44640	44640	43200	44640	43200	44640	525600
Volumen agua (m <sup>3</sup> /sem)	11160	10080	11160	10800	11160	10800	11160	11160	10800	11160	10800	11160	

#### 4.1.2. Demanda del agua

El mayor volumen demandado se obtuvo para el mes de Febrero con un valor de 19208.21 m<sup>3</sup> y el volumen total anual fue de 174290.59 m<sup>3</sup>, en la Tabla 4.4 se muestra el resumen de los cálculos realizados para la demanda mensual y semanal del Fundo.

**Tabla 4.4: Demanda de agua para el Fundo agrícola**

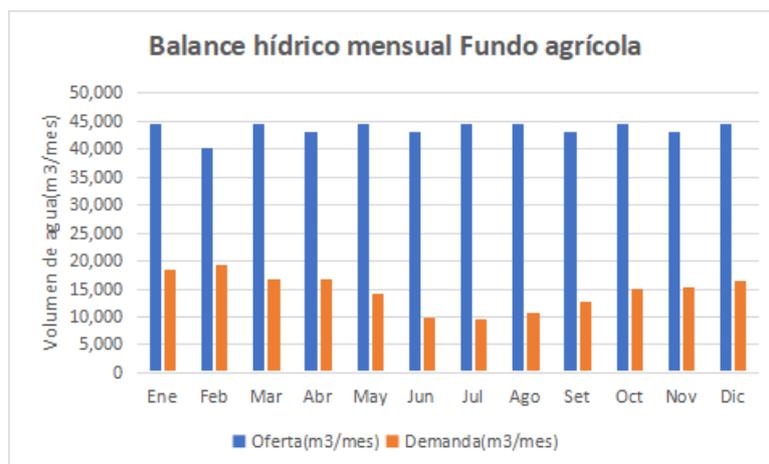
Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Eto(mm/día)	3.72	4.11	4.17	3.72	2.65	1.8	1.68	1.89	2.33	2.83	3.15	3.32	
Kc ponderado	0.75	0.75	0.6	0.7	0.8	0.85	0.85	0.85	0.85	0.8	0.75	0.75	
Etc(mm/día)	2.79	3.08	2.5	2.6	2.12	1.53	1.43	1.61	1.98	2.26	2.36	2.49	
PP (mm/día)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Déficit de humedad (mm/día)	2.79	3.08	2.5	2.6	2.12	1.53	1.43	1.61	1.98	2.26	2.36	2.49	
Eficiencia de riego (%)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	
Nº días del mes	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	
Requerimiento de agua (mm/día)	3.49	3.85	3.13	3.26	2.65	1.91	1.79	2.01	2.48	2.83	2.95	3.11	
Requerimiento de agua (m3/ha/día)	34.88	38.53	31.28	32.55	26.5	19.13	17.85	20.08	24.76	28.3	29.53	31.13	
Requerimiento de agua (m3/ha/mes)	1,081.13	1,117.41	969.53	976.5	821.5	573.75	553.35	622.52	742.69	877.3	885.94	964.88	
Área total (Ha)	17.19	17.19	17.19	17.19	17.19	17.19	17.19	17.19	17.19	17.19	17.19	17.19	
Volumen total (m3/mes)	18584.54	19208.21	16666.13	16786.04	14121.59	9862.76	9512.09	10701.10	12766.80	15080.79	15229.27	16586.20	175105.51
Volumen total (m3/sem)	4646.13	4802.05	4166.53	4196.51	3530.40	2465.69	2378.02	2675.27	3191.70	3770.20	3807.32	4146.55	

### 4.1.3. Balance hídrico

En la Tabla 4.5, observamos que todos los valores del parámetro de balance son positivos, es decir no tendremos déficit de agua para todos los meses y en la Figura 4.5 se muestra la oferta y demanda mensual para el Fundo.

**Tabla 4.5: Balance hídrico mensual para el Fundo agrícola**

Mes	Oferta (m3/mes)	Demanda (m3/mes)	Balance (m3/mes)
Ene	44,640	18,584.54	26,055.46
Feb	40,320	19,208.21	21,111.79
Mar	44,640	16,666.13	27,973.87
Abr	43,200	16,786.04	26,413.97
May	44,640	14,121.59	30,518.42
Jun	43,200	9,862.76	33,337.24
Jul	44,640	9,512.09	35,127.91
Ago	44,640	10,701.10	33,938.90
Set	43,200	12,766.80	30,433.20
Oct	44,640	15,080.79	29,559.21
Nov	43,200	15,229.27	27,970.73
Dic	44,640	16,586.20	28,053.80



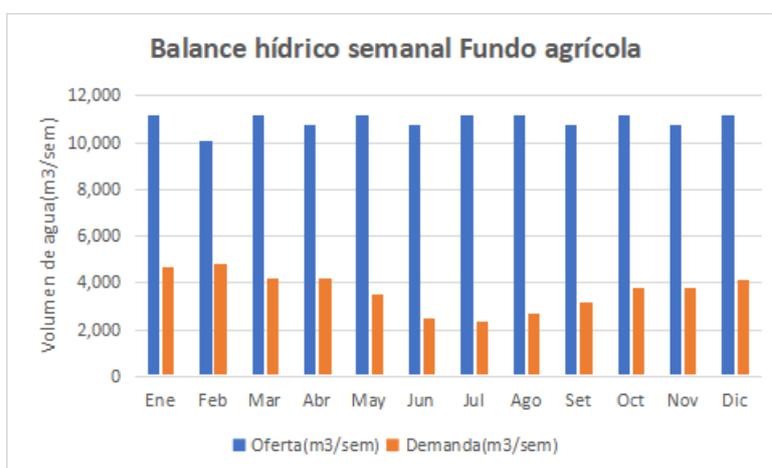
**Figura 4.1: Balance hídrico mensual del Fundo agrícola**

En la Tabla 4.6, observamos que todos los valores del parámetro de balance son positivos, es decir no tendremos déficit de agua semanalmente y en la Figura 4.2 se muestra la oferta y

demanda semanal para el Fundo.

**Tabla 4.6: Balance hídrico semanal para el Fundo agrícola**

Mes	Oferta(m3/sem)	Demanda(m3/sem)	Balance (m3/sem)
Ene	11,160	4,646.13	6,513.87
Feb	10,080	4,802.05	5,277.95
Mar	11,160	4,166.53	6,993.47
Abr	10,800	4,196.51	6,603.49
May	11,160	3,530.40	7,629.60
Jun	10,800	2,465.69	8,334.31
Jul	11,160	2,378.02	8,781.98
Ago	11,160	2,675.27	8,484.73
Set	10,800	3,191.70	7,608.30
Oct	11,160	3,770.20	7,389.80
Nov	10,800	3,807.32	6,992.68
Dic	11,160	4,146.55	7,013.45



**Figura 4.2: Balance hídrico semanal del Fundo agrícola**

## 4.2. Diseño del reservorio

El diseño de reservorio se realizó con las medidas del reservorio ya construido en el Fundo agrícola. La forma del reservorio fue de una pirámide trunca, con un largo de 50 metros y un ancho de 50 metros, la altura del reservorio es de 4.50 metros, y el volumen final del reservorio es 8766 m<sup>3</sup> para el líquido y considerando un borde libre de 0.5 metros el volumen

final es de 9740 m<sup>3</sup>. En la Tabla 4.7, se observa el resumen de estos datos.

**Tabla 4.7: Forma del reservorio**

	Líquido	Total	Unidades
Base mayor	20500	2500	m <sup>2</sup>
L	50	50	m
A	50	50	m
Base menor	1444	1444	m <sup>2</sup>
l	38	38	m
a	38	38	m
H	4.5	4.5	m
H borde libre	-	0.5	m
Volumen	8766	9740	m <sup>3</sup>

### 4.3. Diseño agronómico

En la Tabla 4.8 se muestra los parámetros de diseño para el Fundo agrícola, se dividió en tres partes: lámina de riego a reponer, características agronómicas y características del emisor.

Se escogió por emisor a un gotero autocompensante de la marca AZUD su ficha técnica está en el Anexo 2, el modelo a escoger fue el AZUD PREMIER PC AS 20, pues al tener un mecanismo antisifón previene la introducción de contaminantes al interior del gotero y brinda una mayor uniformidad (AZUD, n.d.). Se diseño con dos líneas de goteros por planta, la ecuación del gotero está definida por la Ecuación 4.1.

$$q = 1,9 \times h^0 \quad (4.1)$$

Donde

q = caudal (m<sup>3</sup>/s)

**Tabla 4.8: Parámetros de diseño agronómico**

PARÁMETROS DE DISEÑO AGRONÓMICO-FUNDO AGRÍCOLA		
Descripción	Unidades	Valores
Área	Ha	17.19
Emisor	-	gotero
LÁMINA DE RIEGO A REPONER		
Evapotranspiración potencial-Eto	mm/día	4.17
Coefficiente del cultivo-Kc	-	0.85
Evapotranspiración real-Etc	mm/día	3.54
Precipitación efectiva-PP	-	0
Capacidad de campo-CC	%	13.39
Punto de marchitez-PM	%	6.79
Humedad disponible-HD	%	50
Densidad aparente- $\rho_a$	gr/cm <sup>3</sup>	1.73
Profundidad de raíz -Pr	mm	600
Lámina neta-Ln	mm	34.25
Requerimiento de lavado-K=LR	-	0.19
CE del agua de riego-CEi	mmhos/cm	0.5
CE del extracto de saturación del suelo-CEext	mmhos/cm	1.3
Eficiencia de riego	%	80
Lámina bruta-Lb	mm/día	4.45
CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS		
Cultivo	-	palta
Distancia entre planta	m	4
Distancia entre hileras	m	6
# hileras por planta	-	2
Q del emisor	l/hr	1.9
Ø bulbo húmedo	m	0.5
Área mojada	%	16.67
Radio de humedecimiento-r	cm	25
Porcentaje de traslape-a	%	40
Espaciamiento entre emisores-Se	cm	40
Coefficiente de variabilidad-Cv	-	0.05
#goteros por planta-e	-	20
Coefficiente de uniformidad-Cu	%	99
Frecuencia de riego	días	1.61
Tiempo de riego	hr	2.8
Tiempo de riego-Fr	días	1
Horas de operación por día-h/D	hr	8
Velocidad de aplicación	mm/hr	1.59
Capacidad del sistema	l/s	26.59
#Turnos	-	3
Tamaño de turnos	ha	5.73
CARACTERÍSTICAS DEL EMISOR		
Emisor	-	Azud Premier PC AS
Lateral de riego	-	Manguera
Díámetro interior	mm	17.2
Espesor de la pared de la manguera	mm	1.1
Caudal del gotero	l/s	1.9
Coefficiente de descarga-k	-	1.9
Exponente del emisor-x	-	0
Presión media nominal de trabajo	m.c. a	10
Rango de presión	m.c. a	May-40

Al usar gotero autocompensante el coeficiente de uniformidad tuvo un valor muy alto de 99 % pero al ser la palta un cultivo muy sensible a las sales la eficiencia de riego bajo a un 80 %.

## 4.4. Diseño hidráulico

Teniendo en consideración los datos del diseño agronómico, se comenzó con los cuatro diseños hidráulicos. Para los cuatro diseños de la subunidad se usaron los datos de la Tabla 4.9.

**Tabla 4.9: Parámetros del diseño hidráulico**

Datos del diseño agronómico	
Caudal promedio (l/hr)	1.9
Espacio entre goteros	0.4
Espacio de laterales (dos laterales por planta)	6
C laterales	140
C portlaterales	150

Se detalló los cálculos para el primer diseño hidráulico de caudales constantes y alturas dinámicas totales variables para un mejor entendimiento, y los datos de: presión y caudales en laterales y subunidades, pérdida de carga por el arco de riego, pérdida de carga en la carga principal para los tres turnos y diagrama de presiones para el segundo, tercer y cuarto diseño se encuentran en el Anexo 3.

### 4.4.1. Caudales constantes y alturas dinámicas totales variables por turno de riego

En la Figura 4.3 se muestra la distribución de los turnos de riego, este diseño es el más común por tener caudales iguales en los turnos de riego y alturas dinámicas totales diferentes por las distancias de la red de distribución hacia el cabezal.

# PRIMER DISEÑO(Q =, ADT≠)

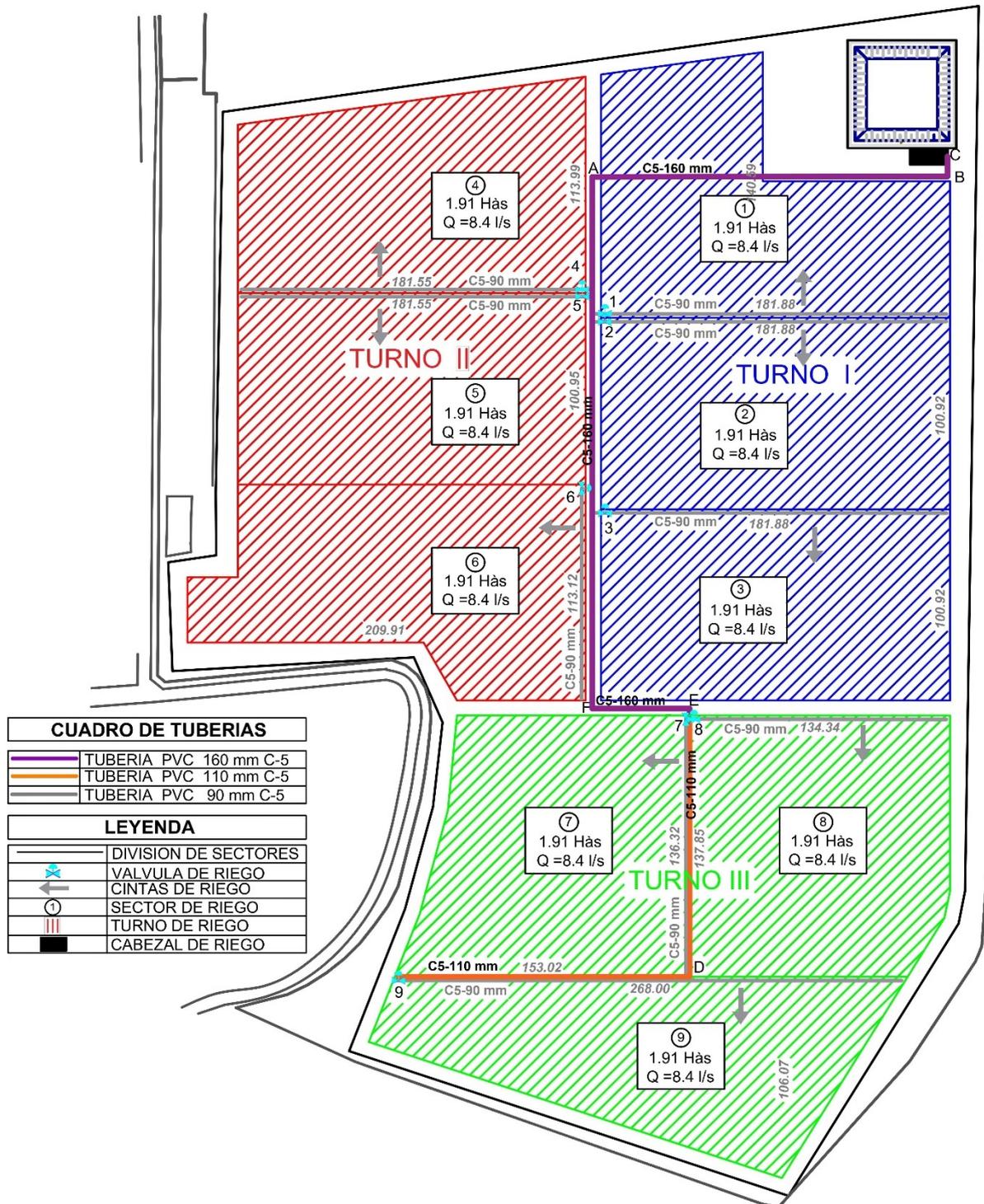


Figura 4.3: Esquema de la distribución de los turnos de riego en el Fondo agrícola del primer diseño

En la Tabla 4.10, se muestra los parámetros de operación para el primer diseño donde la ADT ha sido adherida, las áreas de los tres turnos fueron iguales con un valor de 5.73 ha por ende los caudales de los tres turnos tuvieron un mismo valor de 25 l/s a diferencia de las

alturas dinámicas totales que fueron diferentes para cada turno el I turno de 36.42 m, II turno de 48.41 m y el III turno de 41.03 m.

**Tabla 4.10: Parámetros de operación del segundo diseño**

Turno	N° Sub- unidad	Área		Caudal				ADT	Dosis total		Tiempo
		Subunidad (ha)	Turno (ha)	Subunidad (m3/h)	(l/s)	Turno (m3/h)	(l/s)	Turno (m)	de riego (m3/ha/día)	(m3/día)	de riego (hr)
I	1	1.91	5.73	30.24	8.4	90.73	25.2	36.42	38.53	209.09	2.8
	2	1.91		30.24	8.4						
	3	1.91		30.24	8.4						
II	4	1.91	5.73	30.24	8.4	90.73	25.2	48.41	38.53	209.09	2.8
	5	1.91		30.24	8.4						
	6	1.91		30.24	8.4						
III	7	1.91	5.73	30.24	8.4	90.73	25.2	41.03	38.53	209.09	2.8
	8	1.91		30.24	8.4						
	9	1.91		30.24	8.4						

El diámetro de los laterales fue de 17.20 mm y de los portlaterales de 85.60 mm, los datos para su cálculo se encuentran en la Tabla 4.11 y 4.12.

**Tabla 4.11: Presión y caudales en laterales del primer diseño**

Turno	Subunidad	Porta-lateral (m)	Lateral (m)	Nº goteros	Diámetro interno (mm)	Q lateral (l/s)	L.eq (m)	J (m/100m)	J' (m/100m)	F (n)	hf (m)	hm (m)	h inicio (m)
I	1	182	135	338	17.2	0.18	0.1	4.95	6.19	0.35	2.94	10	12.16
	2	182	101	252	17.2	0.13	0.1	2.88	3.6	0.35	1.28	10	10.94
	3	182	101	252	17.2	0.13	0.1	2.88	3.6	0.35	1.28	10	10.94
II	4	182	114	285	17.2	0.15	0.1	3.61	4.52	0.35	1.82	10	11.33
	5	182	101	252	17.2	0.13	0.1	2.88	3.61	0.35	1.28	10	10.94
	6	113	210	525	17.2	0.28	0.1	11.22	14.02	0.35	10.35	10	17.59
III	7	136	153	383	17.2	0.2	0.1	6.24	7.8	0.35	4.2	10	13.08
	8	134	138	345	17.2	0.18	0.1	5.14	6.43	0.35	3.12	10	12.29
	9	268	106	265	17.2	0.14	0.1	3.16	3.95	0.35	1.48	10	11.08

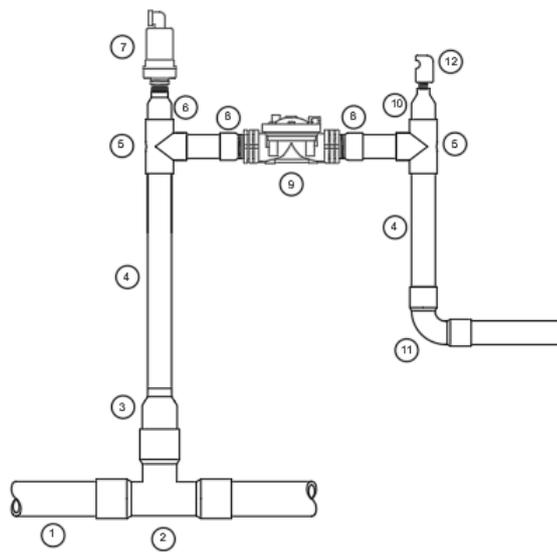
**Tabla 4.12: Presión y caudales en la entrada de las subunidades del primer diseño**

Turno	Subunidad	Área. Subunidad (ha)	Área Turno (ha)	Porta-lateral (m)	Nº laterales	Q. lateral (l/s)	Q. subunidad (l/s)	Diámetro interno (mm)	J (m/100m)	F (n)	hf distribuidora (m)	hf subunidad (m)	h lateral inicio (m)	hm. dist (m)
I	1	1.91	5.73	182	62	0.18	8.4	85.6	2.24	0.36	0.8	3.75	12.16	14.97
	2	1.91		182	62	0.13	8.4	85.6	2.24	0.36	0.8	2.09	10.94	12.51
	3	1.91		182	62	0.13	8.4	85.6	2.24	0.36	0.8	2.09	10.94	12.51
II	4	1.91	5.73	182	62	0.15	8.4	85.6	2.24	0.36	0.8	2.62	11.33	13.29
	5	1.91		182	62	0.13	8.4	85.6	2.24	0.36	0.8	2.09	10.94	12.51
	6	1.91		113	38	0.28	8.4	85.6	2.24	0.36	0.81	11.17	17.59	25.97
III	7	1.91	5.73	136	46	0.2	8.4	85.6	2.24	0.36	0.81	5.01	13.08	16.84
	8	1.91		134	46	0.18	8.4	85.6	2.24	0.36	0.81	3.93	12.29	15.24
	9	1.91		268	90	0.14	8.4	85.6	2.24	0.36	0.8	2.28	11.08	12.79

En la Figura 4.4 se muestra el diseño del arco de riego con su respectiva numeración para que en la Tabla 4.13 se coloque el nombre del accesorio, marca, modelo y pérdida de carga que tuvo un total de 1.6 m para los tres turnos riego con una válvula hidráulica de 3".

**Tabla 4.13: Pérdida de carga por el arco de riego del primer diseño**

N°	Accesorios	Marca	Modelo	Pérdida de carga(m)
1	tubería matriz ø 6"	-	-	-
2	tee pvc ø 6"	PAVCO	SP	0.01
3	adaptador pvc 6 "x 3"	NICOLL	ASTM F-714	0
4	espiga pvc ø 3"	PAVCO	RDE-26	-
5	tee pvc ø 3"	PAVCO	SP	0.12
6	adaptador pvc 3x2 "	PAVCO	SP	0.02
7	válvula de aire de doble efecto 2"	DOROT	DAV	-
8	adaptador pvc 3x 2"	PAVCO	SP	0.03
9	válvula hidráulica 3"	BERMAD	SERIE -100	1.3
10	adaptador pvc 3x1 "	PAVCO	SP	0.02
11	codo pvc ø 3"	PAVCO	SP	0.08
12	válvula de aire cinética 1"	DOROT	DAV	-
			Total(m)	1.57



**Figura 4.4: Diseño del arco de riego para el I, II y III turno del primer diseño**

El diámetro de las tuberías primarias y secundarias fueron de 104.6 y 152 mm, clase 5, cumpliendo con la velocidad máxima de 2 m/s que fue representada en observación con el símbolo O.K, el diseño de la red principal para los tres turnos están en la Tabla 4.14.

**Tabla 4.14: Pérdida de carga en la carga principal para los tres turnos del primer diseño**

TURNO	No válvula	Q (l/s)	Q acum (l/s)	Diámetro interno (mm)	L (m)	L. acum (m)	hf (m)	hf acum (m)	V crítica (m/s)	Obs	Presión subunidad (m)	hf arco riego (m)	desnivel topográfico (m)	Presión inicial (m)	Presión final (m)
1	3/2	8.4	8.4	152	102.64	102.64	0.14	0.14	0.46	O.K.	12.51	1.6	0	14.11	14.25
	2/1	8.4	16.8	152	4	106.64	0.02	0.16	0.93	O.K.	14.25	-	0	14.25	14.27
	1/A	8.4	25.2	152	73.5	180.14	0.78	0.94	1.39	O.K.	16.57	-	0	16.57	17.35
	A/B	0	25.2	152	189.29	369.43	2	2.94	1.39	O.K.	17.35	-	0	17.35	19.35
	B/C	0	25.2	152	10.77	380.2	0.11	3.05	1.39	O.K.	19.35	-	0	19.35	19.46
2	6/5	8.4	8.4	152	103.03	103.03	0.14	0.14	0.46	O.K.	25.97	1.6	0	27.57	27.71
	5/4	8.4	16.8	152	4	107.03	0.02	0.16	0.93	O.K.	27.71	-	0	27.71	27.73
	4/A	8.4	25.2	152	60.52	167.55	0.64	0.8	1.39	O.K.	27.73	-	0	27.73	28.37
	A/B	0	25.2	152	189.29	356.84	2	2.8	1.39	O.K.	28.37	-	0	28.37	30.37
	B/C	0	25.2	152	10.77	367.61	0.11	2.92	1.39	O.K.	30.37	-	0	30.37	30.49
3	9/D	8.4	8.4	104.6	155	155	1.32	1.32	0.98	O.K.	12.79	1.6	0	14.39	15.72
	D/7	0	8.4	104.6	138.36	293.36	1.18	2.51	0.98	O.K.	15.72	-	0	15.72	16.9
	7/E	16.8	25.2	152	5.73	299.09	0.06	2.57	1.39	O.K.	18.44	-	0	18.44	18.5
	E/F	0	25.2	152	51.83	350.92	0.55	3.12	1.39	O.K.	18.5	-	0	18.5	19.05
	F/A	0	25.2	152	285.51	636.43	3.02	6.13	1.39	O.K.	19.05	-	0	19.05	22.07
	A/B	0	25.2	152	189.29	825.72	2	8.13	1.39	O.K.	22.07	-	0	22.07	24.07
	B/C	0	25.2	152	10.77	836.49	0.11	8.25	1.39	O.K.	24.07	-	0	24.07	24.18

En las Figuras 4.5, 4.6 y 4.7 se muestran los diagramas de presiones finales del I, II y III turno, que son las presiones en las subunidades contando con el arco de riego, los números en los cuadrados rojos representan la presión final y los números de abajo que solo tienen algunas subunidades se colocaron para saber que había dos presiones en ese punto y la mayor es la que pasa al siguiente.

En la Tabla 4.15 se muestra las presiones y caudales para las subunidades y en la Tabla 4.16 se muestran los parámetros para el cálculo de Q y ADT total para cada turno.

**Tabla 4.15: Caudal y presión para las subunidades del primer diseño**

Subunidad	Caudal(l/s)	Presión en la subunidad(m)
1	8.4	14.97
2	8.4	12.51
3	8.4	12.51
4	8.4	13.29
5	8.4	12.51
6	8.4	25.97
7	8.4	16.84
8	8.4	15.24
9	8.4	12.79

**Tabla 4.16: Cálculo de altura dinámica total del primer diseño**

Parámetro	Pérdida (m)		
	I-v1	II-v6	III-v7
Presión en la subunidad	14.97	25.97	16.84
hf arco de riego	1.6	1.6	1.6
hf en matriz	2.89	2.92	5.74
hf en accesorios (10 %)	0.29	0.29	0.57
hf en cabezal de riego	8	8	8
Factor de seguridad (10 %)	2.77	3.88	3.28
Desnivel topográfico	-1.6	-1.75	-2.5
Profundidad de reservorio (bomba sumergible)	7.5	7.5	7.5
ADT(m)	36.42	48.41	41.03
Q (l/s)	25.2	25.2	25.2

En la Figura 4.8 observamos los requerimientos totales de Q y ADT.

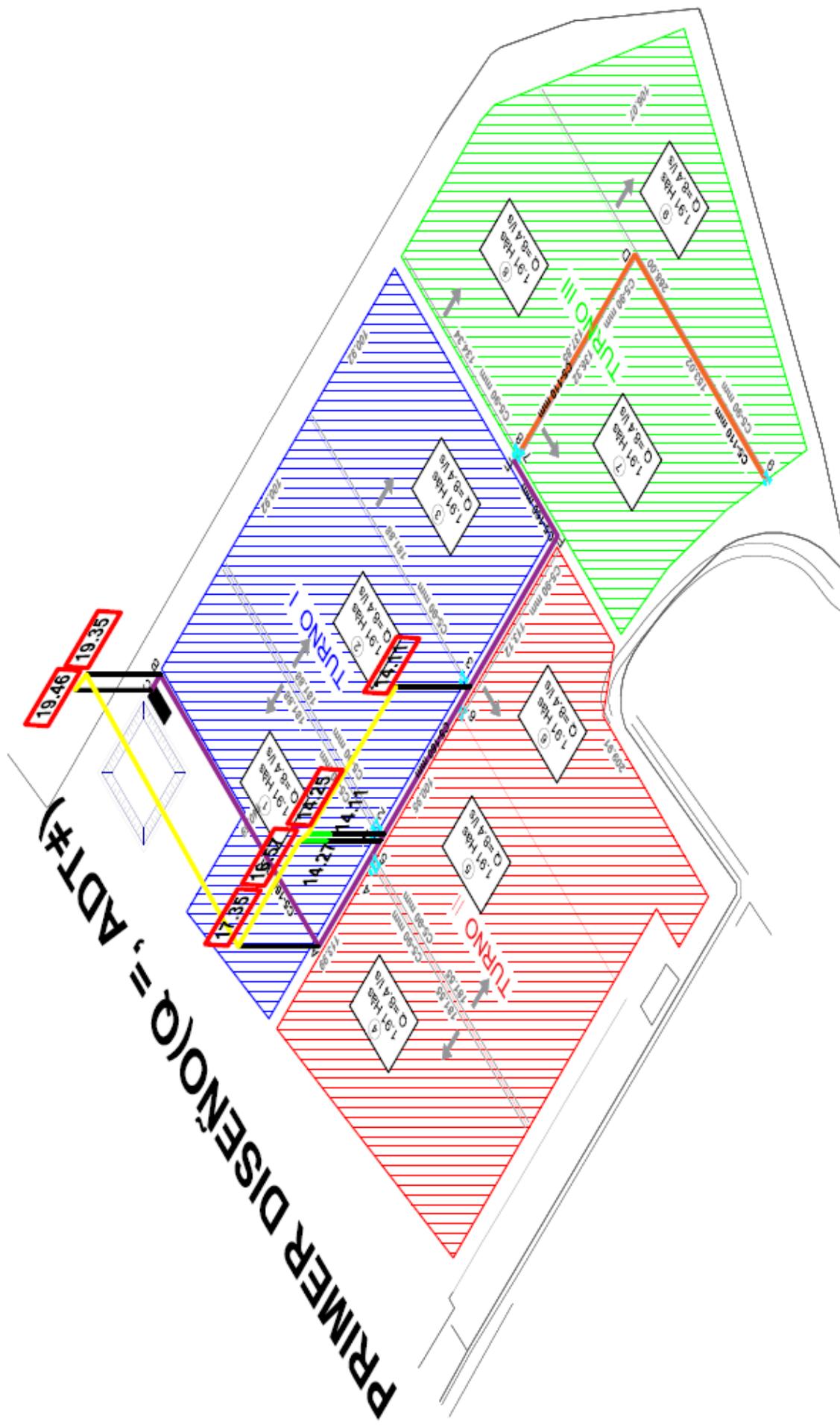


Figura 4.5: Diagrama de presiones - I Turno del primer diseño



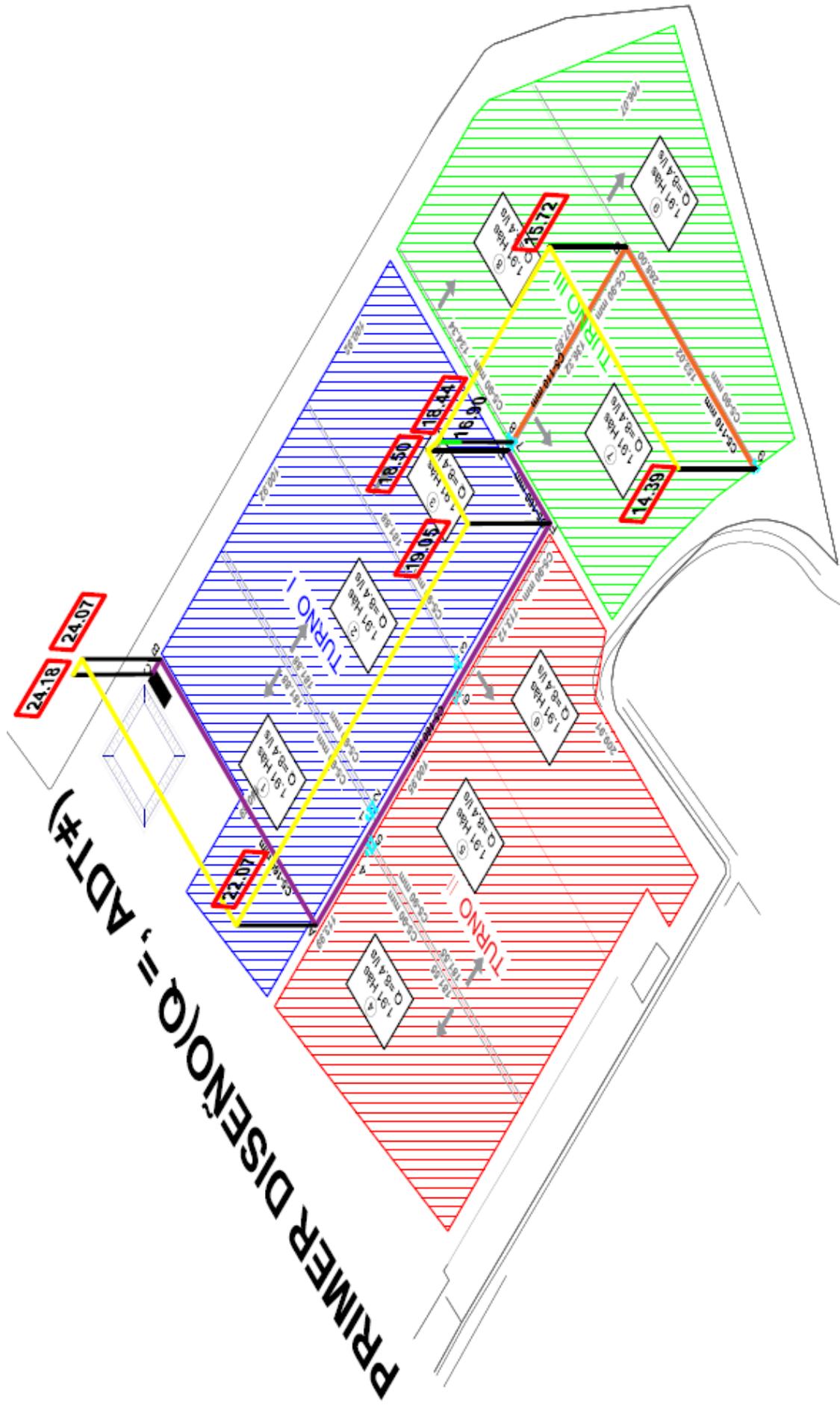


Figura 4.7: Diagrama de presiones - III Turno del primer diseño

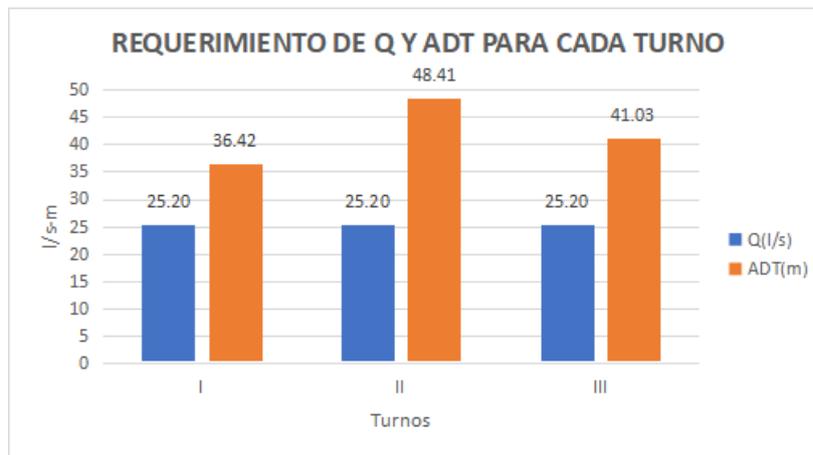


Figura 4.8: Gráfica de requerimiento de Q y ADT del primer diseño

La mayor presión en la subunidad perteneció a la subunidad seis y esto se debió principalmente a que el lateral con más longitud pertenece a esta subunidad con un valor de 210 m por ello en la Tabla 4.16 observamos que para el II turno el ADT es el mayor valor en comparación con los demás con una diferencia de 11.99 m con el menor ADT.

#### 4.4.2. Caudales variables y alturas dinámicas totales constantes por turno de riego

En la Figura 4.9 se muestra la distribución de los turnos de riego, este diseño se presenta cuando se tiene monocultivos y por ende se tiene diferentes demandas de caudales en el sistema de riego.

En la Tabla 4.17, se muestra los parámetros de operación para el segundo diseño, donde los valores de área, caudal para los tres turnos son de 5.24, 7.35 y 4.60 ha por ende los caudales también difieren con valores de 23.05 l/s, 32.33 l/s y 20.23 l/s, por cálculos no se pudo llegar a un valor de ADT constante para los tres turnos, pero si similares con valores muy cercanos para el I turno de 30.43 metros, II turno de 30.86 metros y III turno de 31.21 metros.

# SEGUNDO DISEÑO (Q ≠, ADT=)

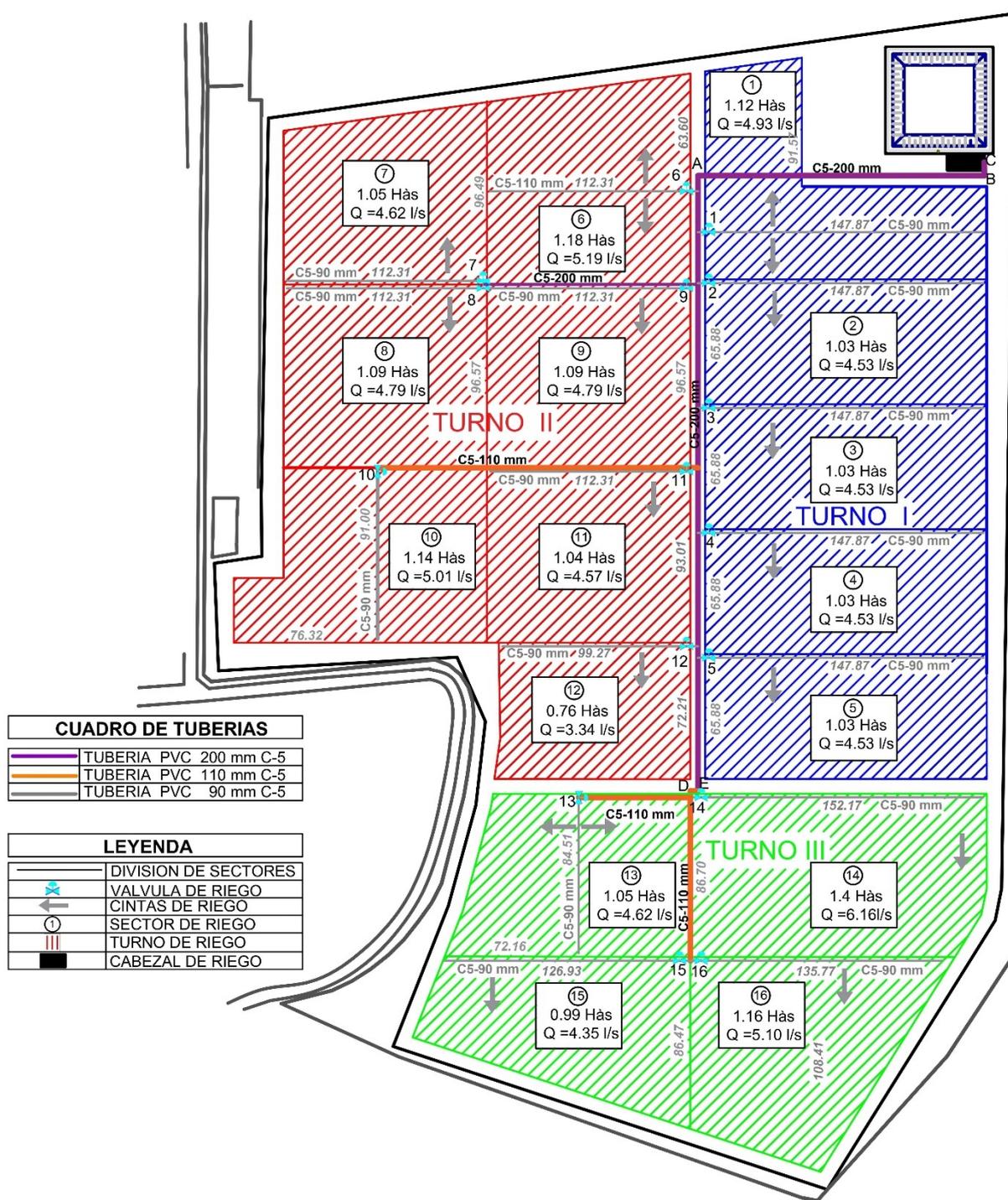


Figura 4.9: Esquema de la distribución de los turnos de riego en el Fundo agrícola del segundo diseño

**Tabla 4.17: Parámetros de operación del segundo diseño**

Turno	N°	Área		Caudal				ADT	Dosis total		Tiempo de riego
		Subunidad	Turno	Subunidad	Turno	Turno	Turno		de riego	de riego	
	Sub-unidad	(ha)	(ha)	(m3/h)	(l/s)	(m3/h)	(l/s)	(m)	(m3/ha/día)	(m3/día)	(hr)
I	1	1.12	5.24	17.73	4.93	82.97	23.05	30.43	38.53	201.9	2.8
	2	1.03		16.31	4.53						
	3	1.03		16.31	4.53						
	4	1.03		16.31	4.53						
	5	1.03		16.31	4.53						
II	6	1.18	7.35	18.68	5.19	116.38	32.33	30.86	38.53	283.2	2.8
	7	1.05		16.63	4.62						
	8	1.09		17.26	4.79						
	9	1.09		17.26	4.79						
	10	1.14		18.05	5.01						
	11	1.04		16.47	4.57						
	12	0.76		12.03	3.34						
III	13	1.05	4.6	16.63	4.62	72.83	20.23	31.21	38.53	177.24	2.8
	14	1.4		22.17	6.16						
	15	0.99		15.68	4.35						
	16	1.16		18.37	5.1						

Para el diseño hidráulico, el diámetro de los portlaterales fueron de 85.6 mm, la tuberías primarias y secundarias fueron de 104.6 y 190.2 mm cumpliendo con la velocidad máxima de 2 m/s y una pérdida en el arco de riego de 1.5 metros al utilizar válvulas hidráulicas de 2". En la Tabla 4.18 se muestra las presiones y caudales para las subunidades y en la Tabla 4.19 se muestran los parámetros para el cálculo de Q y ADT total para cada turno.

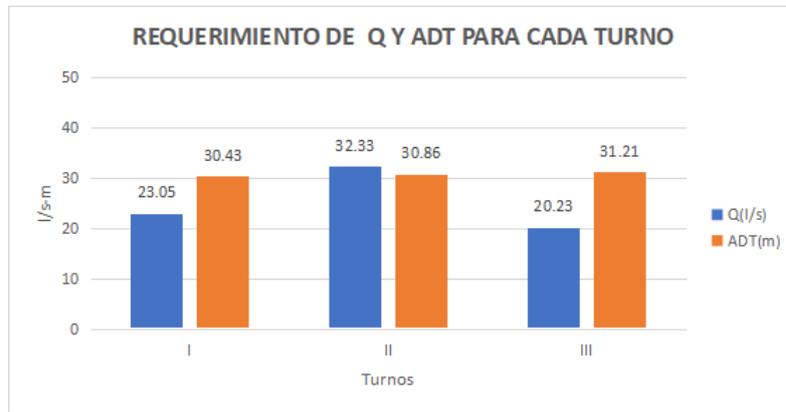
**Tabla 4.18: Caudal y presión para las subunidades del segundo diseño**

Subunidad	Caudal(l/s)	Presión en la subunidad(m)
1	4.93	11.67
2	4.53	10.76
3	4.53	10.76
4	4.53	10.76
5	4.53	10.76
6	5.19	10.78
7	4.62	11.88
8	4.79	11.89
9	4.79	11.89
10	5.01	11.09
11	4.57	11.71
12	3.34	11.27
13	4.62	10.94
14	6.16	11.57
15	4.35	11.4
16	5.1	12.57

**Tabla 4.19: Cálculo de altura dinámica total del segundo diseño**

Parámetro	Pérdida (m)		
	I-v1	II-v8	III-v16
Presión en la subunidad	11.67	11.89	12.57
hf arco de riego	1.5	1.5	1.5
hf en matriz	0.58	1.22	2.13
hf en accesorios (10 %)	0.06	0.12	0.21
hf en cabezal de riego	8	8	8
Factor de seguridad (10 %)	2.18	2.27	2.44
Desnivel topográfico	-1.06	-1.65	-3.15
Profundidad de reservorio (bomba sumergible)	7.5	7.5	7.5
ADT(m)	30.43	30.86	31.21
Q (l/s)	23.05	32.33	20.23

En la Figura 4.10 observamos los requerimientos totales de Q y ADT para cada turno.



**Figura 4.10:** Gráfica de requerimiento de Q y ADT del segundo diseño

La mayor presión en la subunidad perteneció a la subunidad 16 y esto se debió principalmente a que el lateral con más longitud pertenece a esta subunidad con un valor de 108 m por ello en la Tabla 4.10 observamos que para el III turno el ADT es el mayor valor en comparación con los demás.

El ADT no pudo ser constante para los tres turnos porque las longitudes de los laterales, portalaterales y las áreas de las subunidades fueron variables, además considerando que el terreno tiene un desnivel topográfico que afectó al cálculo final del ADT, pero aun así los valores de ADT estuvieron muy cercanas con una diferencia de 0.78 metros entre sí dado que se usó mayores diámetros de tubería para menores pérdidas de carga en la matriz.

#### **4.4.3. Caudales y alturas dinámicas totales variables por turno de riego**

En la Figura 4.11 se muestra la distribución de los turnos de riego, este diseño es frecuente cuando se tiene una asociación de propietarios y cada agricultor tiene diferente área de terreno al otro.

# TERCER DISEÑO (Q ≠, ADT≠)

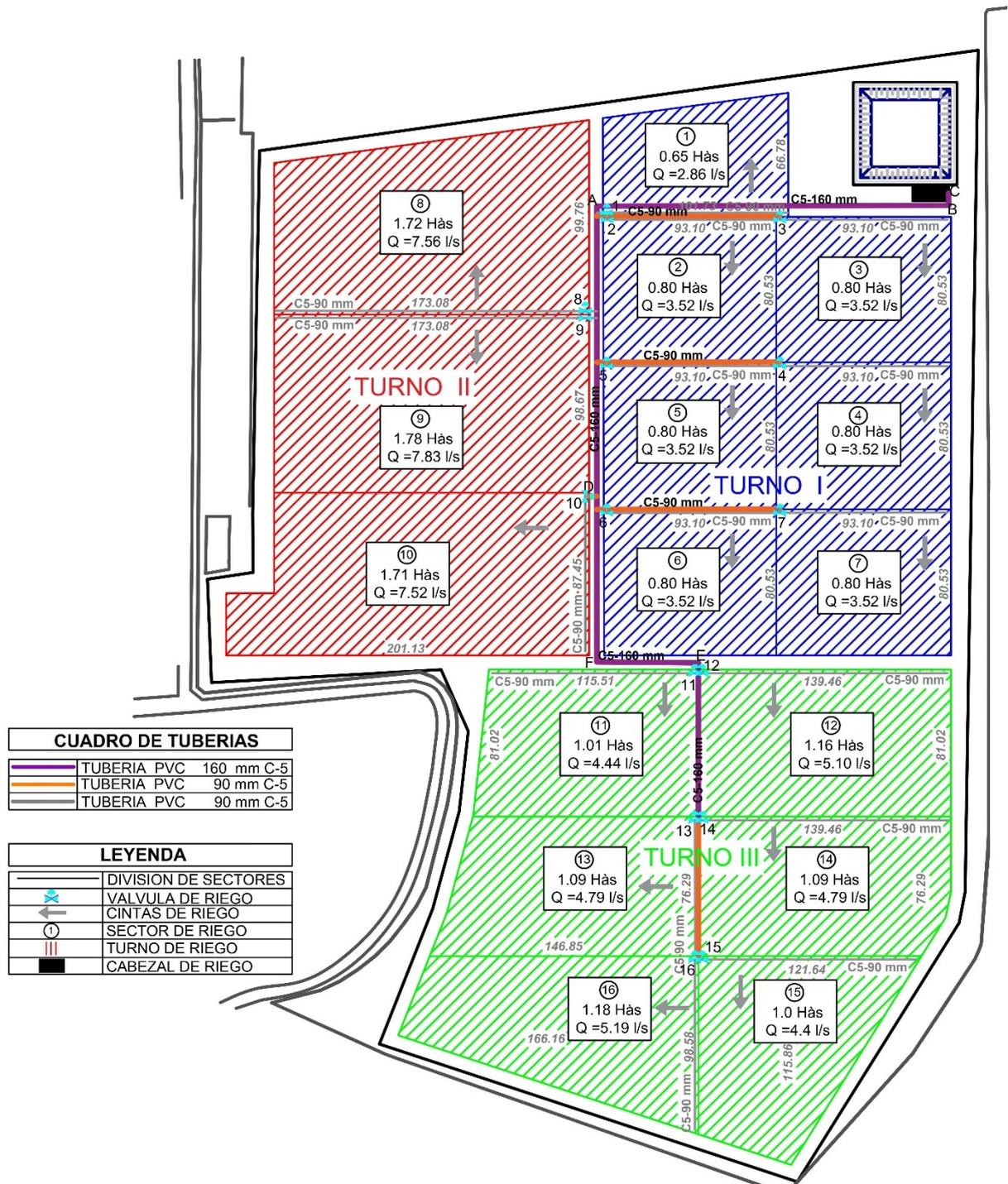


Figura 4.11: Esquema de la distribución de los turnos de riego en el Fundo agrícola del tercer diseño

En la Tabla 4.20, se ve los parámetros de operación para el 3 diseño, donde los valores de área, caudal y ADT para el I, II y III turno son de 5.45, 5.21 y 6.53 has por ende los caudales también difieren con valores de 23.97, 22.91 y 28.72 l/s, las ADT para cada turno también

son diferentes con de 32.23, 45.71 y 46.82 metros.

**Tabla 4.20: Parámetros de operación del tercer diseño**

Turno	N° Sub- unidad	Área		Caudal				ADT	Dosis total de riego		Tiempo de riego (hr)
		Subunidad (ha)	Turno (ha)	Subunidad (m3/h)	(l/s)	Turno (m3/h)	(l/s)	Turno (m)	(m3/ha/día)	(m3/día)	
1	1	0.65	5.45	10.29	2.86	86.29	23.97	32.23	38.53	209.99	2.8
	2	0.8		12.67	3.52						
	3	0.8		12.67	3.52						
	4	0.8		12.67	3.52						
	5	0.8		12.67	3.52						
	6	0.8		12.67	3.52						
	7	0.8		12.67	3.52						
2	8	1.72	5.21	27.23	7.56	82.49	22.91	45.71	38.53	200.74	2.8
	9	1.78		28.18	7.83						
	10	1.71		27.08	7.52						
3	11	1.01	6.53	15.99	4.44	103.39	28.72	46.82	38.53	251.6	2.8
	12	1.16		18.37	5.1						
	13	1.09		17.26	4.79						
	14	1.09		17.26	4.79						
	15	1		15.83	4.4						
	16	1.18		18.68	5.19						

El diámetro de los portalaterales fueron de 85.6 mm, la tuberías primarias y secundarias fueron de 85.6 y 152 mm cumpliendo con la velocidad máxima de 2 m/s y una pérdida en el arco de riego de 1.5 metros al utilizar válvulas hidráulicas de 2". En la Tabla 4.21 se muestra las presiones y caudales para las subunidades y en la Tabla 4.22 se muestran los parámetros para el cálculo de Q y ADT total para cada turno.

**Tabla 4.21: Caudal y presión para las subunidades del tercer diseño**

Subunidad	Caudal(l/s)	Presión en la subunidad(m)
1	2.86	10.67
2	3.52	11.12
3	3.52	11.12
4	3.52	11.12
5	3.52	11.12
6	3.52	11.12
7	3.52	11.12
8	7.56	12.34
9	7.83	12.37
10	7.52	24.1
11	4.44	11.2
12	5.1	11.26
13	4.79	15.76
14	4.79	11.07
15	4.4	13
16	5.19	18.14

**Tabla 4.22: Cálculo de altura dinámica total del tercer diseño**

Parámetro	Pérdida (m)		
	I-v1	II-v8	III-v16
Presión en la subunidad	11.12	24.1	18.14
hf arco de riego	1.5	1.5	1.5
hf en matriz	2.85	2.59	9.85
hf en accesorios (10 %)	0.28	0.26	0.98
hf en cabezal de riego	8	8	8
Factor de seguridad (10 %)	2.38	3.64	3.85
Desnivel topográfico	-1.4	-1.88	-3
Profundidad de reservorio (bomba sumergible)	7.5	7.5	7.5
ADT(m)	32.23	45.71	46.82
Q(l/s)	23.97	22.91	28.72

En la Figura 4.12 observamos los requerimientos totales de Q y ADT para cada turno.

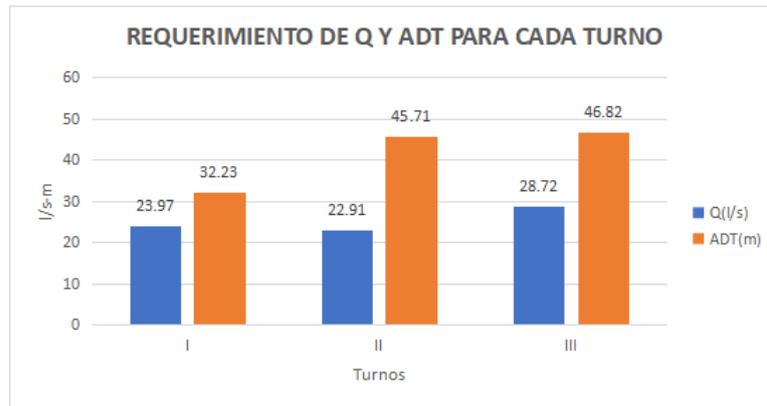


Figura 4.12: Gráfica de requerimiento de Q y ADT del tercer diseño

La mayor presión en la subunidad perteneció a la subunidad 10 y esto se debió principalmente a que el lateral con más longitud pertenece a esta subunidad con un valor de 201 m, pero a diferencia de los dos diseños anteriores esto no implicó que fuera el mayor ADT de los tres turnos como se muestra en la Tabla 4.12 pues el mayor valor fue del III turno con un valor de 46.82 m por tener mayores pérdidas de carga en la matriz con un valor muy alto de 9.85 m.

#### 4.4.4. Caudales y alturas dinámicas totales constantes por turno de riego

En la Figura 4.13 se muestra la distribución de los turnos de riego, este diseño es usado en diferente caso al tener un sistema de riego nuevo, tener monocultivo y un pozo en el medio.

# CUARTO DISEÑO(Q =, ADT=)

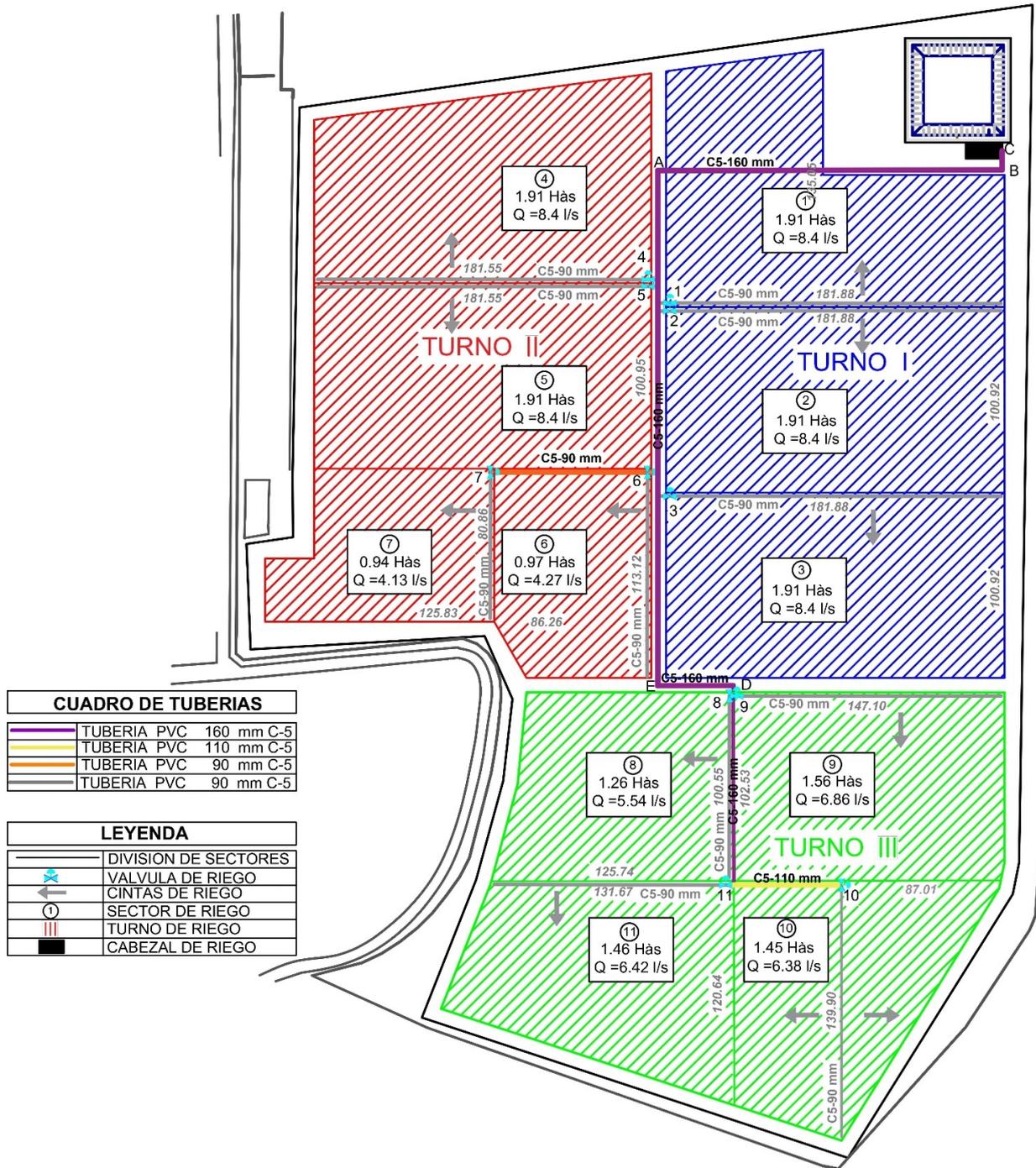


Figura 4.13: Esquema de la distribución de los turnos de riego en el Fundo agrícola del cuarto diseño

En la Tabla 4.23, se muestra los parámetros de operación para el cuarto diseño, donde se observa que las áreas de los tres turnos son iguales con un valor de 5.73 has por ende los caudales de los tres turnos son de 25 l/s, por cálculos no se pudo llegar a un valor de ADT constante para los tres turnos, pero si similares con valores muy cercanos para el I turno de 35.84 metros, II turno de 34.65 metros y el III turno de 34.91 metros.

**Tabla 4.23: Parámetros de operación del cuarto diseño**

Turno	N°	Área		Caudal				ADT	Dosis total		Tiempo
		Sub-unidad	Subunidad	Subunidad	Subunidad	Turno	Turno	Turno	de riego	de riego	
		(ha)	(ha)	(m3/h)	(l/s)	(m3/h)	(l/s)	(m)	(m3/ha/día)	(m3/día)	(hr)
I	1	1.91	5.73	30.24	8.4	90.73	25.2	35.84	38.53	209.09	2.8
	2	1.91		30.24	8.4						
	3	1.91		30.24	8.4						
II	4	1.91	5.73	30.24	8.4	90.73	25.2	34.65	38.53	209.09	2.8
	5	1.91		30.24	8.4						
	6	0.97		15.36	4.27						
	7	0.94		14.88	4.13						
III	8	1.26	5.73	19.95	5.54	90.73	25.2	34.91	38.53	209.09	2.8
	9	1.56		24.7	6.86						
	10	1.46		22.97	6.38						
	11	1.45		23.11	6.42						

El diámetro de los portlaterales fue de 85.6 mm, la tuberías primarias y secundarias fueron de 85.6, 104.6 y 152 mm cumpliendo con la velocidad máxima de 2 m/s, en este caso el objetivo fue tener menores perdidas de carga en las tuberías, pero en comparación con el primer diseño se usó el diámetro de 85.6 mm debido a que se tuvieron más subunidades de riego lo que conlleva a tener menores valores de caudales. La pérdida en el arco de riego de 1.2 metros al utilizar válvulas hidráulicas de 3". En la Tabla 4.24 se muestra las presiones y caudales para las subunidades y en la Tabla 4.23 se muestran los parámetros para el cálculo de 4.25 y caudal total para cada turno.

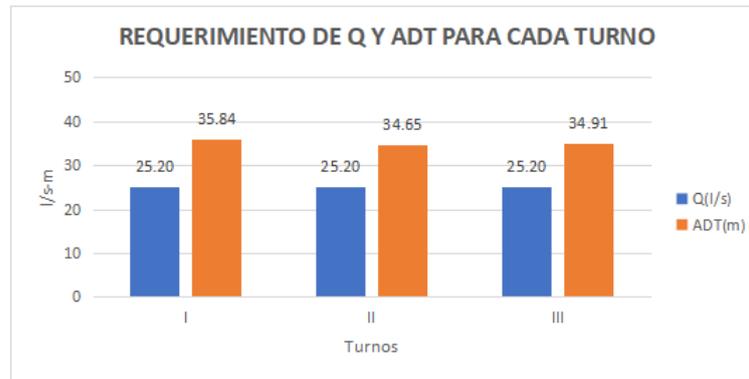
**Tabla 4.24: Caudal y presión para las subunidades del cuarto diseño**

Subunidad	Caudal(l/s)	Presión en la subunidad(m)
1	8.4	14.97
2	8.4	12.51
3	8.4	12.51
4	8.4	13.29
5	8.4	12.51
6	4.27	11.39
7	4.13	13.74
8	5.54	13.85
9	6.86	12.41
10	6.38	11.61
11	6.42	13.53

**Tabla 4.25: Cálculo de altura dinámica total del cuarto diseño**

Parámetro	Pérdida (m)		
	I-v1	II-v8	III-v16
Presión en la subunidad	14.97	13.74	11.61
hf arco de riego	1.2	1.2	1.2
hf en matriz	2.77	3.49	5.94
hf en accesorios (10 %)	0.28	0.35	0.59
hf en cabezal de riego	8	8	8
Factor de seguridad (10 %)	2.72	2.68	2.73
Desnivel topográfico	-1.6	-2.3	-2.67
Profundidad de reservorio (bomba sumergible)	7.5	7.5	7.5
ADT(m)	35.84	34.65	34.91
Q (l/s)	25.2	25.2	25.2

En la Figura 4.14 observamos los requerimientos totales de Q y ADT para cada turno.



**Figura 4.14:** Gráfica de requerimiento de Q y ADT del cuarto diseño

La mayor presión en la subunidad perteneció a la subunidad uno y esto se debió principalmente a que el lateral con más longitud pertenece a esta subunidad con un valor de 135 m. Por ello, en la Tabla 4.25 observamos que para el I turno el ADT es el mayor valor en comparación con los demás.

El ADT no pudo ser constante por las mismas condiciones que el segundo diseño, pero sí estuvieron muy cercanas con una diferencia de 1.19 metros entre sí dado que se usó mayores diámetros de tubería para menores pérdidas de carga en la matriz.

En los cuatro diseños se logró tener los caudales constantes o variables para cada diseño específico y esto se debió a que solo se necesitó tener áreas iguales en los turnos de riego para tener caudales constantes y áreas variables en los turnos de riego para tener caudales variables, con respecto al ADT no se pudo lograr tener valores constantes en los tres turnos de riego que se requerían por los motivos ya explicados pero los valores no variaron mucho.

## 4.5. Diseño del cabezal de riego

Se consideró una pérdida de carga de 8 metros en el cabezal de riego para los cuatro diseños. El diseño del cabezal se calculó con el caudal máximo de los 4 diseño hidráulicos de 32.33 l/s o 116.39 m<sup>3</sup>/hr. Las fichas técnicas para el filtro de gravas, mallas y aparatos de medición se encuentran en el Anexo 4.

#### **4.5.1. Filtro de gravas**

Se utilizó la marca NETAFIM, el caudal de diseño total se multiplico por 1.5 como factor de seguridad dando como resultado 174.58 m<sup>3</sup>/hr, se utilizó 4 filtros cada filtro con una capacidad de 43.65 m<sup>3</sup>/hr, diámetro de entrada y salida de 4” y una pérdida de carga de 0.9 metros con agua limpia. El filtro de grava tiene retrolavado automático que dará una pérdida de carga de 5 metros con esta se calculó la suma de pérdida de carga.

#### **4.5.2. Filtro de mallas**

Se utilizó 1 filtro de mallas FILTOMAT M100-4500, con un caudal de 174.58 m<sup>3</sup>/hr considerando el factor de seguridad, el caudal máximo del filtro es de 180 m<sup>3</sup>/hr, tamaño de entrada y salida de 6” y la pérdida de presión fue de 2 metros para agua limpia. El filtro de mallas también cuenta con un retrolavado automático con una pérdida de carga de 5 metros, cabe señalar que solo se contralavará un filtro a la vez.

#### **4.5.3. Aparatos de control y medición**

Para esto se consideró un caudalímetro modelo TURBO-IR-A con una pérdida de carga de 0.25 metros de 5”, una válvula sostenedora de presión modelo RAM Serie 400 de 8 “con una pérdida de carga de 0.40 metros y una válvula de aire combinada de SERIE DAV.

### **4.6. Escenarios que se presentan en el sistema de riego por turnos**

En la Tabla 4.26 se muestra el resumen de los requerimientos de Q y ADT de los cinco escenarios que se realizaron en el Fundo agrícola además en que escenarios se usó el VDF.

Los Q y ADT de los primeros cuatro escenarios son del diseño hidráulico, el quinto escenario tuvo una configuración de bombas en paralelo tomando como datos base al segundo escenario, por ende, los caudales se dividieron en dos y los ADT para los tres turnos tuvieron los mismos valores que el segundo escenario.

**Tabla 4.26: Escenarios en el Fundo agrícola**

Escenario	Descripción	Q (l/s)			ADT (m)			
		N° Turno						
		I	II	III	I	II	III	
Con VDF	1°	Q=, ADT≠	25.2	25.2	25.2	36.42	48.41	41.03
	2°	Q ≠, ADT=	23.05	32.33	20.23	30.43	30.86	31.21
	3°	Q ≠, ADT≠	23.97	22.91	28.72	32.33	45.71	46.82
Sin VDF	4°	Q=, ADT=	25.2	25.2	25.2	35.84	34.65	34.91
	5°	Paralelo	11.53	16.06	10.12	30.43	30.86	31.21

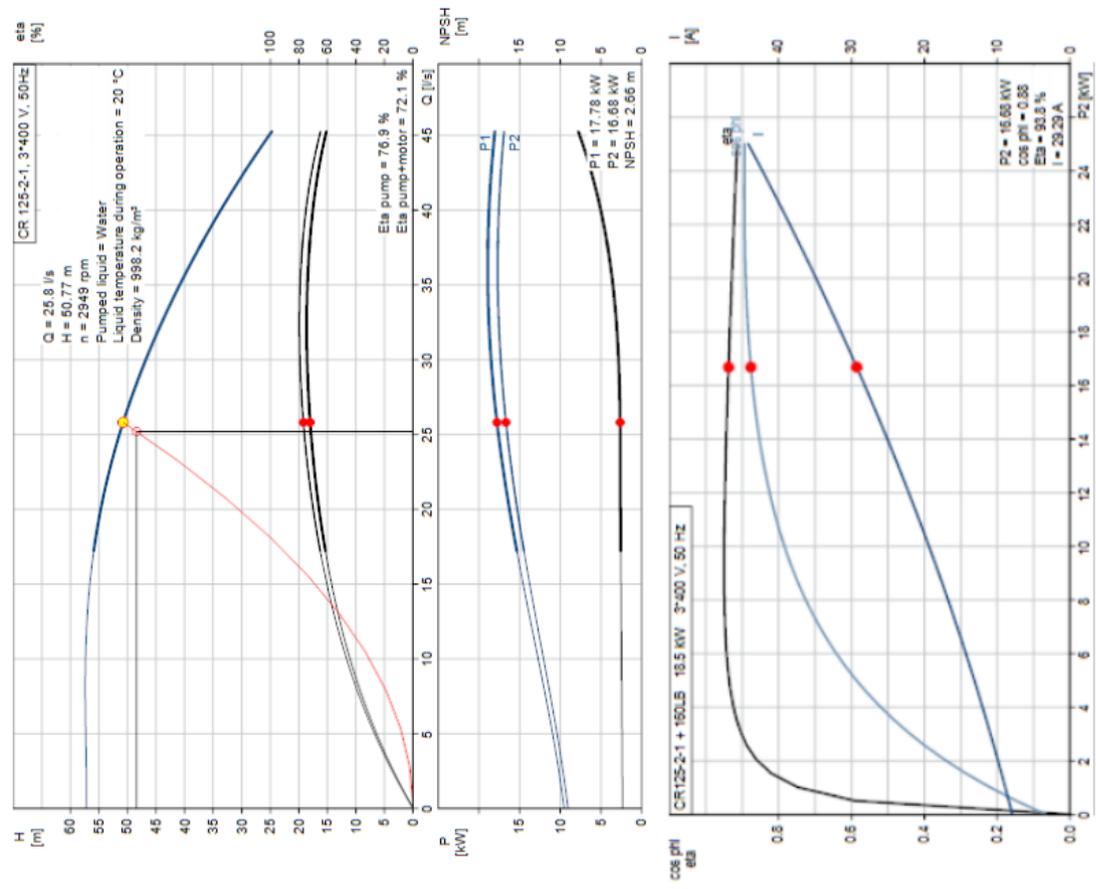
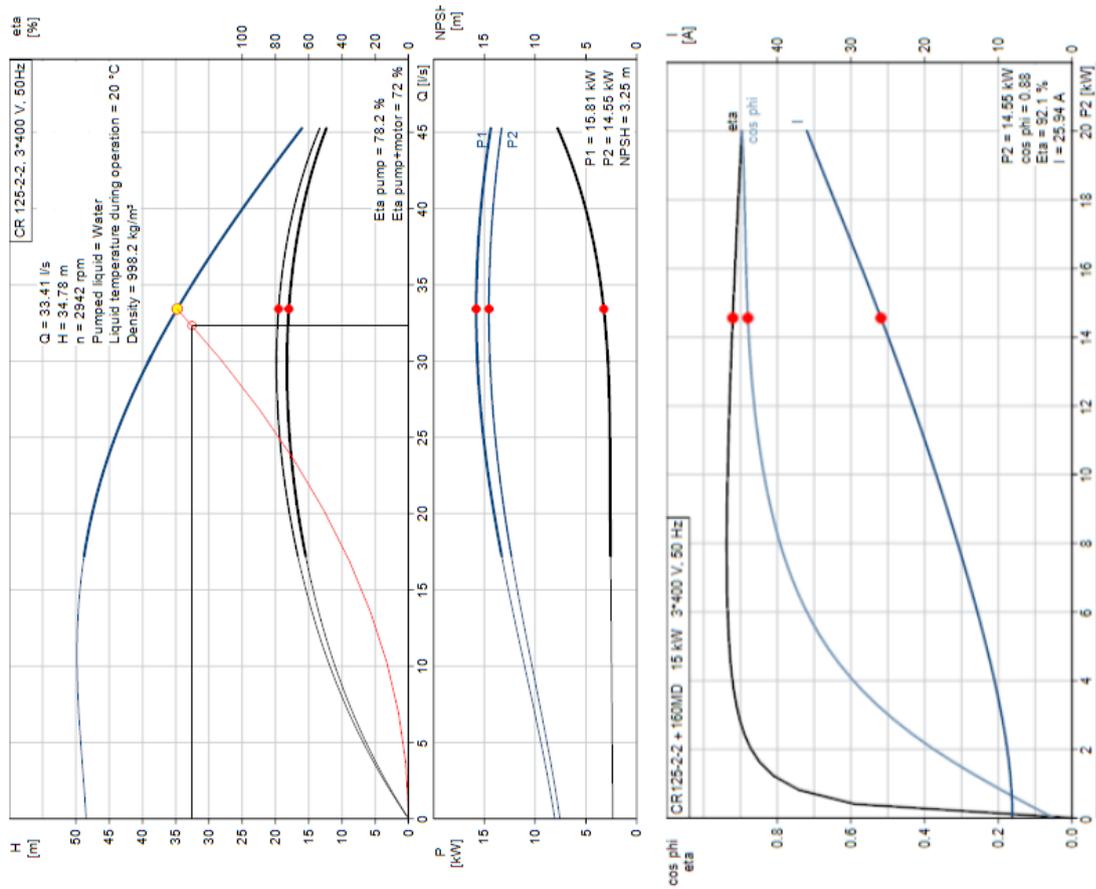
## 4.7. Selección de bomba y motores

En la Tabla 4.27 se muestra los puntos de elegidos para la selección de la bomba donde cada Q y ADT tuvieron el mayor valor de los tres turnos de riego de la Tabla 4.25 para los cinco escenarios, con estos puntos elegidos se seleccionó la bomba de la marca Grundfos y los modelos utilizados fueron diferentes, pero pertenecían al mismo grupo de bombas centrifugas verticales CR que se usan para agricultura. El diámetro de succión de la bomba del primer, segundo, tercer y cuarto escenario es de 150 mm y del quinto escenario de 100 mm. Respecto a la eficiencia del motor, el mayor valor lo obtuvo el primer escenario con un valor de 93.8 % lo cual nos va a brindar una mayor eficiencia en la bomba.

**Tabla 4.27: Puntos elegidos para la selección de la bomba**

Escenario	Descripción	Modelo	Q (l/s)	ADT (m)	$\eta$ motor (%)
1°	Q=, ADT≠	CR 125-2-1 AFAV-HQQV	25.2	48.41	93.8
2°	Q≠, ADT=	CR 125-2-2 AFAV-HQQV	32.33	31.21	92.1
3°	Q≠, ADT≠	CR 125-2 AFAV-HQQV	28.72	46.82	93.2
4°	Q=, ADT=	CR 125-2-2 AFAV-HQQV	25.2	35.84	92.2
5°	Paralelo	CR 64-2-2 AFAE-HQQE	16.06	31.21	90.4

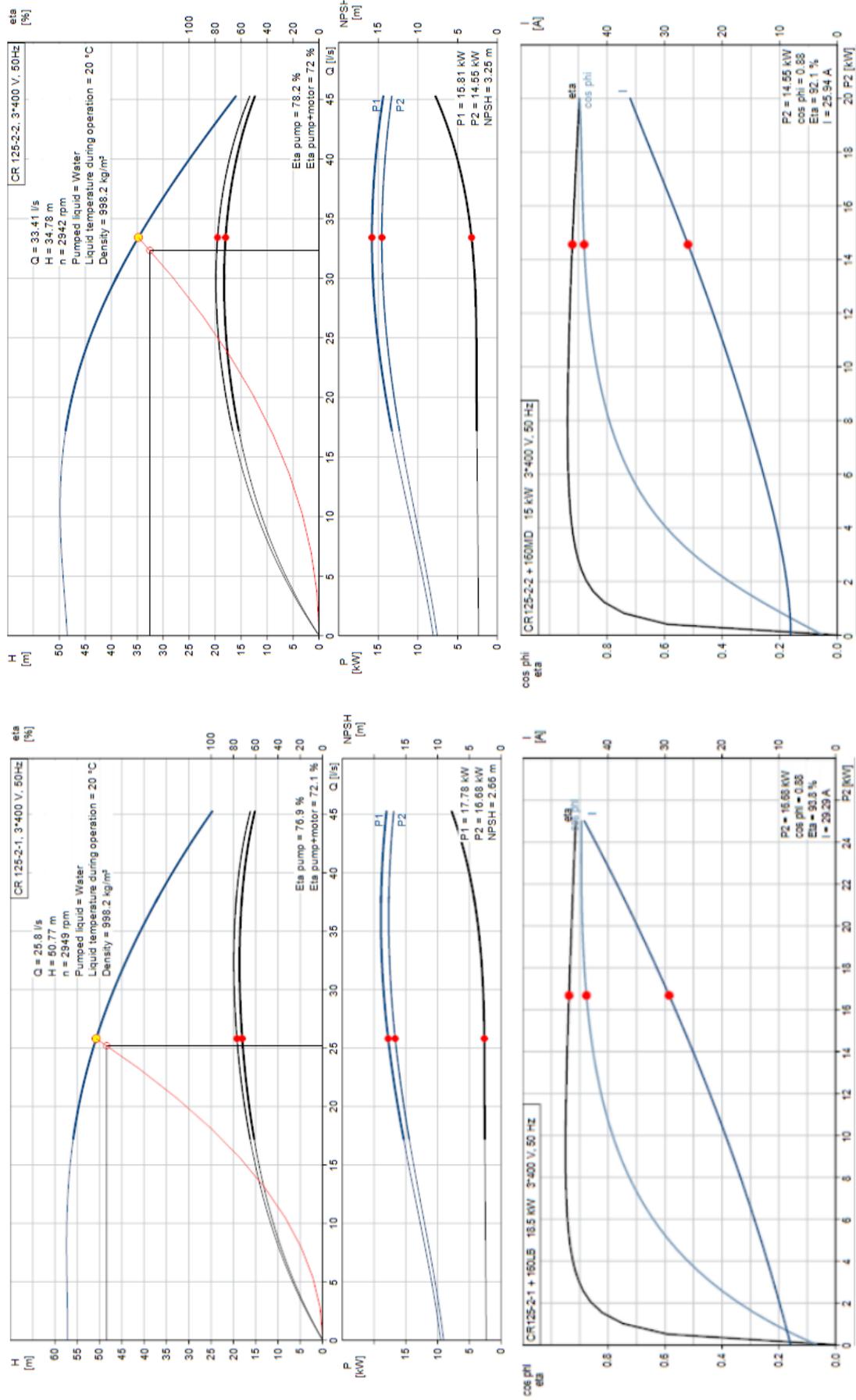
En las Figuras 4.15, 4.16 y 4.17 se observan las curvas características y gráficas del motor para los cinco escenarios.



a )

b )

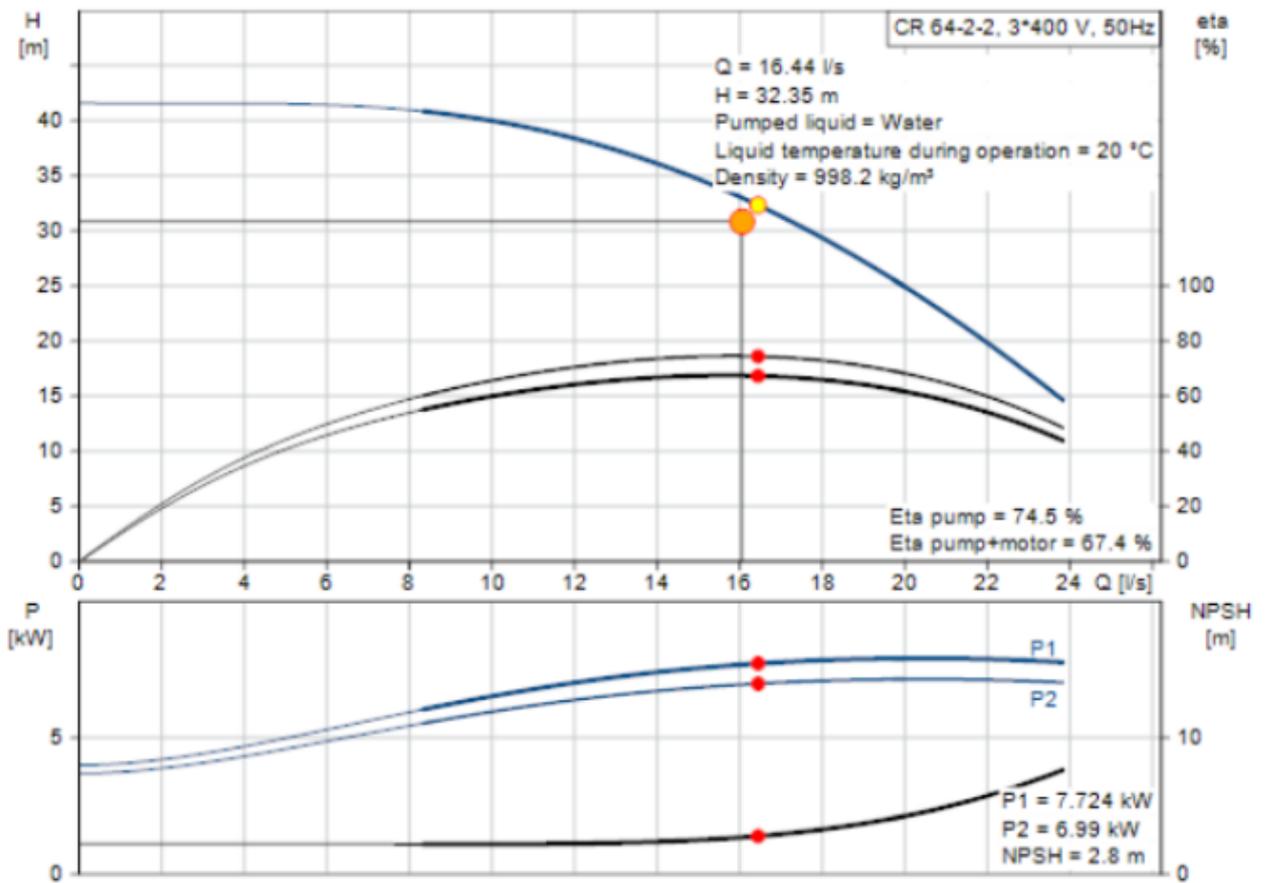
Figura 4.15: Diagrama de presiones - I Turno del primer diseño  
 Fuente: Grundfos (nd)



a )

b )

Figura 4.16: Diagrama de presiones - I Turno del primer diseño  
Fuente: Grundfos (nd)



**Figura 4.17: Diagrama de presiones - I Turno del primer diseño**

**Fuente: Grundfos (nd)**

El punto brindado por la bomba que es el de color amarillo estuvo muy cercano al valor requeridos de Q y ADT para el primer, segundo, tercer y quinto escenario, pero para el cuarto escenario el punto brindado estuvo alejado del punto requerido con una diferencia de Q de 2.09 l/s y 6.16 m por lo que probablemente influya en un mayor gasto de energía en este escenario.

La gráfica de motor que nos proporciona Grundfos se mantiene constante a partir de una potencia de 4 kW para los cuatro primeros escenarios lo que genera que se tenga el mayor valor de eficiencia del motor para un amplio rango de caudales.

## 4.8. Desarrollo de las curvas características en formato Excel para cada escenario

Al tener seleccionadas las bombas y motores que se utilizaron en cada escenario se procedió a pasar los puntos de las cuatro curvas características de altura dinámica total (ADT), eficiencia ( $\eta$ ), potencia (P) y Altura Neta Positiva en la Aspiración (NPSHr) al Excel además se ajustaron las curvas características a una curva polinómica para así obtener sus ecuaciones.

El primer escenario fue detallado para un mejor entendimiento.

### Primer escenario (Caudal contante/altura dinámica total variable)

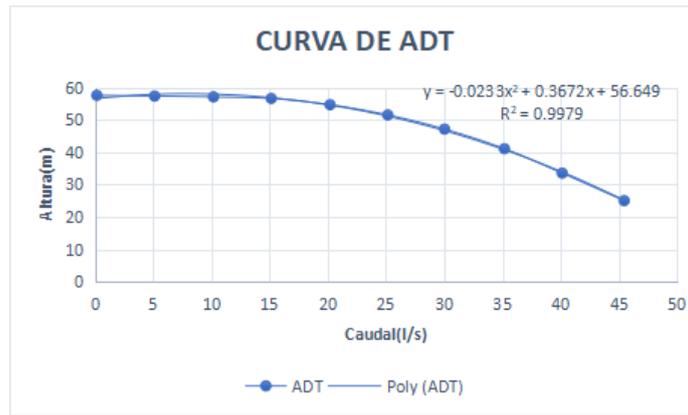
**Gráfica de ADT** Los puntos sacados de la gráfica de Q vs ADT se muestran en la Tabla 4.28.

**Tabla 4.28: Puntos de Q y ADT de la ficha técnica del primer escenario**

Q (l/s)	ADT (m)
0.18	57.6
5.14	57.36
10.19	57.12
15.15	56.63
20.2	54.69
25.16	51.53
30.03	47.15
35.17	41.08
40.13	33.54
45.45	25.03

Al tener los puntos, se procedió a graficarlos y ajustar la curva a una polinómica de segundo grado, en la Figura 4.18 se observa la curva de ADT con su respectiva ecuación y un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.9979 la cual se ajusta muy bien a la curva (Ecuación 4.2).

$$ADT = -0,0233Q^2 + 0,3672Q + 56,649 \quad (4.2)$$



**Figura 4.18: Curva de ADT del primer escenario**

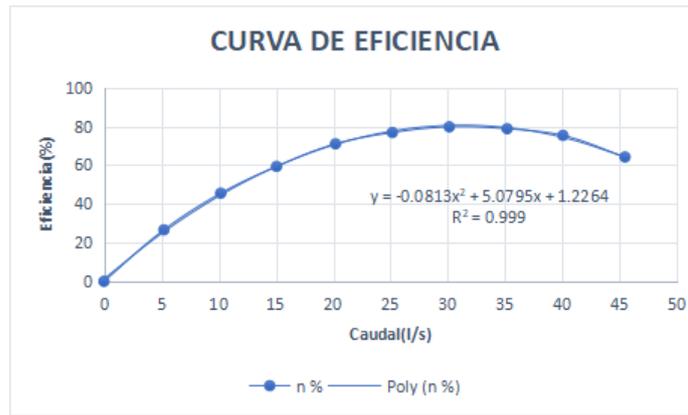
**Gráfica de eficiencia** Los puntos sacados por la gráfica de Q vs n se muestran en la Tabla 4.29.

**Tabla 4.29: Puntos de Q y n de la ficha técnica del primer escenario**

Q (l/s)	$\eta$ (%)
0	0
5.23	26.59
10.19	45.5
15.06	59.32
20.2	70.96
25.16	76.8
30.12	79.72
35.17	78.76
40.04	75.32
45.45	64.16

Al tener los puntos, se procedió a graficarlos y ajustar la curva a una polinómica de segundo grado, en la Figura 4.19 se observa la curva de eficiencia con su respectiva ecuación y con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.999 la cual se ajusta muy bien a la curva (Ecuación 4.3).

$$\eta = -0,0813Q^2 + 5,0795Q + 1,2264 \quad (4.3)$$



**Figura 4.19: Curva de eficiencia del primer escenario**

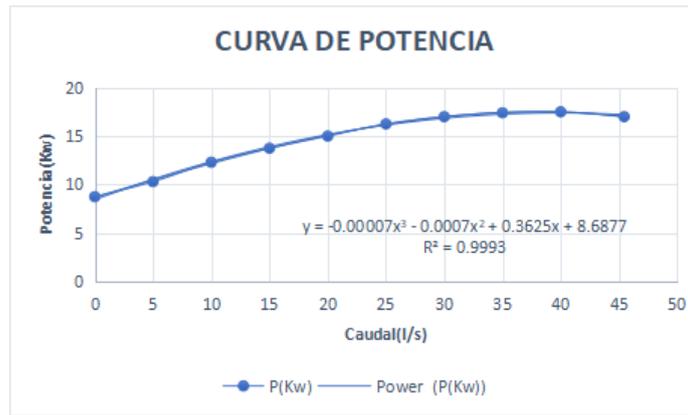
**Gráfica de potencia** Los puntos sacados por la gráfica de Q vs P se muestran en la Tabla 4.30.

**Tabla 4.30: Puntos de Q y P de la ficha técnica del primer escenario**

Q (l/s)	P (kW)
0	8.75
5	10.3
10	12.3
15	13.75
20	15
25	16.25
30	17
35	17.4
40	17.5
45.45	17

Al tener los puntos, se procedió a graficarlos y ajustar la curva a una polinómica de tercer grado, en la Figura 4.20 se observa la curva de potencia con su respectiva ecuación y con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.9993 la cual se ajusta muy bien a la curva (Ecuación 4.4).

$$\eta = -0,00007Q^3 - 0,0007Q^2 + 0,3625Q + 8,6877 \quad (4.4)$$



**Figura 4.20: Curva de potencia del primer escenario**

**Gráfica de NPSHr** Los puntos sacados por la gráfica de Q vs NPSHr se muestran en la Tabla 4.31.

**Tabla 4.31: Puntos de Q y P de la ficha técnica del primer escenario**

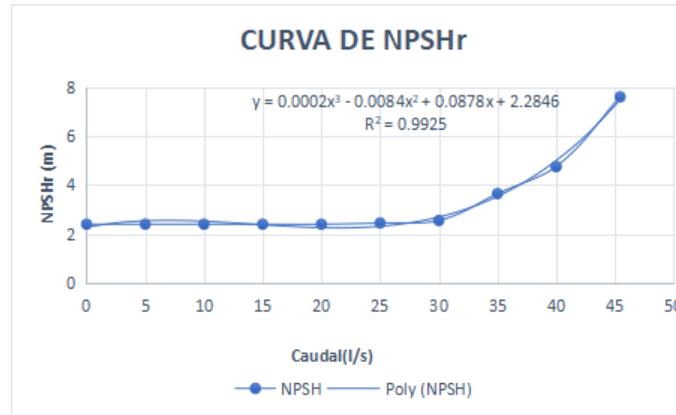
Q (l/s)	NPSHr (m)
0	2.4
5	2.4
10	2.4
15	2.4
20	2.4
25	2.45
30	2.55
35	3.65
40	4.75
45.45	7.6

Al tener los puntos, se procedió a graficarlos y ajustar la curva a una polinómica de tercer grado. En la Figura 4.21 se observa la curva de NPSHr con su respectiva ecuación y con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.9925 la cual se ajusta muy bien a la curva (Ecuación 4.5).

$$\eta = 0,0002Q^3 - 0,0084Q^2 + 0,0878Q + 2,2846 \quad (4.5)$$

El mismo procedimiento del primer escenario se siguió para los demás escenarios y se obtuvieron las ecuaciones para las curvas características que se muestran en la Tabla 4.32 donde

las ecuaciones de ADT y eficiencia se ajustaron a ecuaciones de segundo grado y las de potencia y NPSHr se ajustaron a ecuaciones de tercer grado para los cinco escenarios.



**Figura 4.21: Curva de NPSHr del primer escenario**

**Tabla 4.32: Ecuaciones de las curvas características para los cinco escenarios**

Escenario	ADT (m)	$\eta$ (%)	P (kW)	NPSHr (m)
1°(Q=, ADT≠)	$-0,0233Q^2 + 0,3672Q + 56,649$	$-0.0813Q^2 + 5.0795Q + 1.2264$	$-0.00007Q^3 - 0.0007Q^2 + 0.3625Q + 8.6877$	$0.0002Q^3 - 0.0084Q^2 + 0.0878Q + 2.2846$
2°(Q≠, ADT=)	$-0.0268Q^2 + 0.5162Q + 47.739$	$-0.0947Q^2 + 5.4738Q + 0.8161$	$-0.0001Q^3 + 0.0018Q^2 + 0.2575Q + 7.4391$	$0.0002Q^3 - 0.0085Q^2 + 0.0895Q + 2.2816$
3°(Q≠, ADT≠)	$-0.0226Q^2 + 0.3502Q + 65.657$	$-0.0776Q^2 + 5.0728Q + 1.317$	$-0.0002Q^3 + 0.0089Q^2 + 0.2522Q + 10.688$	$0.0002Q^3 - 0.0085Q^2 + 0.0887Q + 2.2831$
4°(Q=, ADT=)	$-0.0268Q^2 + 0.518Q + 47.716$	$-0.0957Q^2 + 5.537Q + 0.3635$	$-0.0002Q^3 + 0.008Q^2 + 0.1694Q + 7.597$	$0.0002Q^3 - 0.0085Q^2 + 0.0895Q + 2.2816$
5°(Paralelo)	$-0.0727Q^2 + 0.6464Q + 40.848$	$-0.3286Q^2 + 9.8659Q + 1.5139$	$-0.0004Q^3 + 0.0064Q^2 + 0.2127Q + 3.4106$	$0.0014Q^3 - 0.031Q^2 + 0.1874Q + 1.8124$

Con las fórmulas de cada curva de ADT,  $n$ ,  $P$  y  $NPSHr$  se hallaron los valores de ADT,  $\eta$ ,  $P$  y  $NPSHr$  para la velocidad de 50 Hz para los cinco escenarios que se muestran en la Tabla 4.33.

**Tabla 4.33: Valores de ADT,  $n$ ,  $P$  y  $NPSHr$  para los cinco escenarios**

Escenario	Q (l/s)	ADT (m)	n (%)	P (kW)	NPSHr (m)
1	0	56.65	1.23	8.69	2.28
	5	57.9	24.59	10.47	2.54
	10	57.99	43.89	12.17	2.52
	15	56.91	59.13	13.73	2.39
	20	54.67	70.3	15.1	2.28
	25	51.27	77.4	16.22	2.35
	30	46.7	80.44	17.04	2.76
	35	40.96	79.42	17.52	3.64
	40	34.06	74.33	17.59	5.16
	45.45	25.21	64.15	17.15	7.7
2	0	47.74	0.82	7.44	2.28
	5	49.65	25.82	8.76	2.54
	10	50.22	46.08	10.09	2.53
	15	49.45	61.62	11.37	2.39
	20	47.34	72.41	12.51	2.27
	25	43.89	78.47	13.44	2.33
	30	39.11	79.8	14.08	2.72
	35	32.98	76.39	14.37	3.58
	40	25.51	68.25	14.22	5.06
	45.37	15.99	54.23	13.49	7.52
3	0	65.66	1.32	10.69	2.28
	5	66.84	24.74	12.15	2.54
	10	66.9	44.29	13.9	2.52
	15	65.83	59.95	15.8	2.38
	20	63.62	71.73	17.69	2.26
	25	60.29	79.64	19.43	2.31
	30	55.82	83.66	20.86	2.69
	35	50.23	83.81	21.84	3.55
	40	43.51	80.07	22.22	5.03
	45.41	34.96	71.66	21.77	7.51
4	0	47.72	0.36	7.6	2.28
	5	49.64	25.66	8.62	2.54
	10	50.22	46.16	9.89	2.53
	15	49.46	61.89	11.26	2.39
	20	47.36	72.82	12.59	2.27
	25	43.92	78.98	13.71	2.33
	30	39.14	80.34	14.48	2.72
	35	33.02	76.93	14.75	3.58
	40	25.56	68.72	14.37	5.06
	45.37	16.05	54.58	13.07	7.52
5	0	40.85	1.51	3.41	1.81
	3	42.13	28.15	4.1	2.13
	6	42.11	48.88	4.83	2.12
	9	40.78	63.69	5.55	2.01
	12	38.14	72.59	6.19	2.02
	15	34.19	75.57	6.69	2.37
	18	28.93	72.63	6.98	3.31
	21	22.36	63.79	7	5.04
	23	17.26	54.6	6.82	6.76
	24	14.49	49.02	6.67	7.81

En la Figura 4.22 se muestran las cuatro curvas características que fueron halladas con los valores de ADT,  $\eta$ ,  $P$  y  $NPSHr$  para los cinco escenarios.

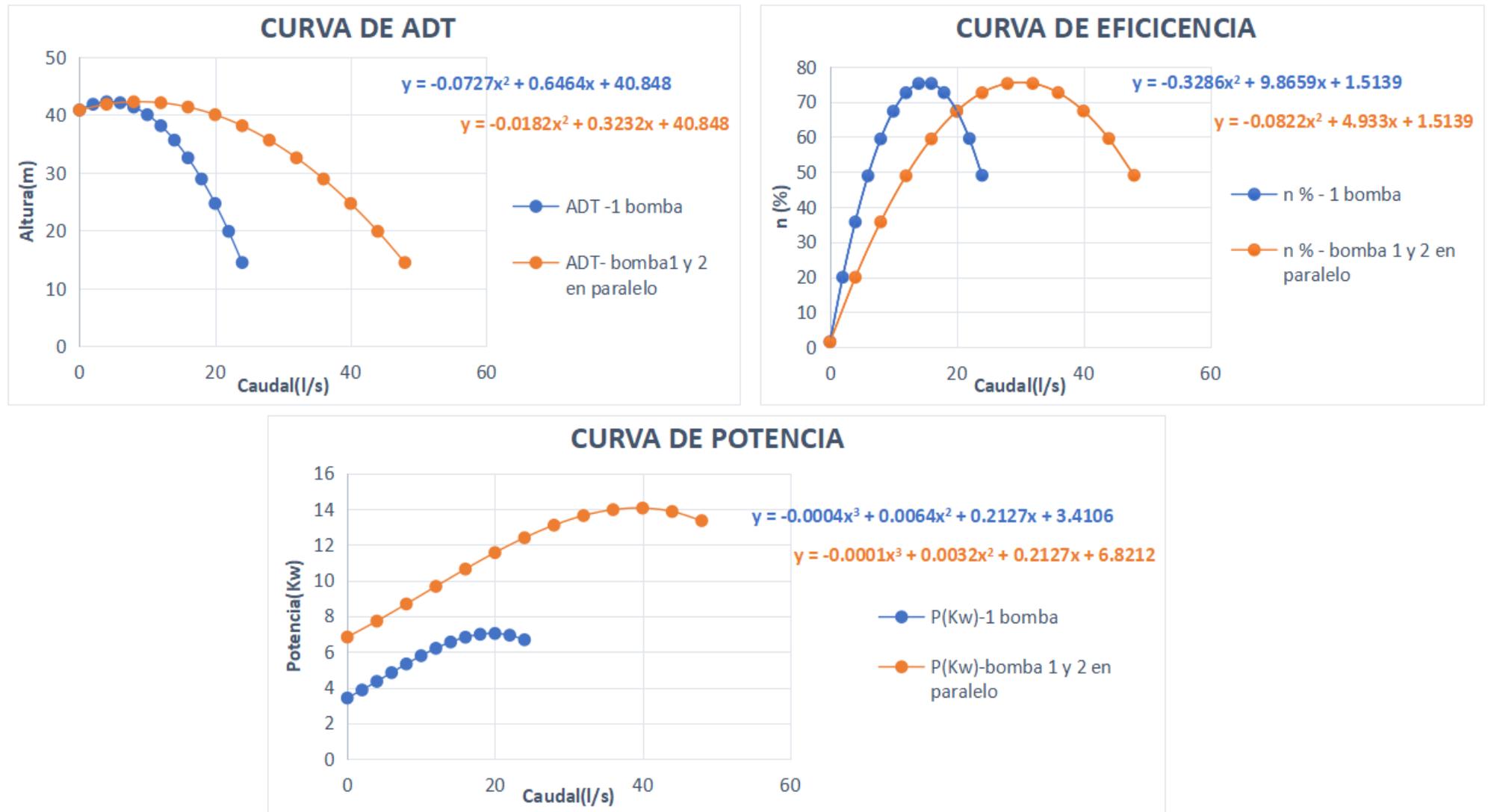


Figura 4.22: Comparación de curvas de ADT, eficiencia y potencia de la 1 bomba y 2 bombas en paralelo

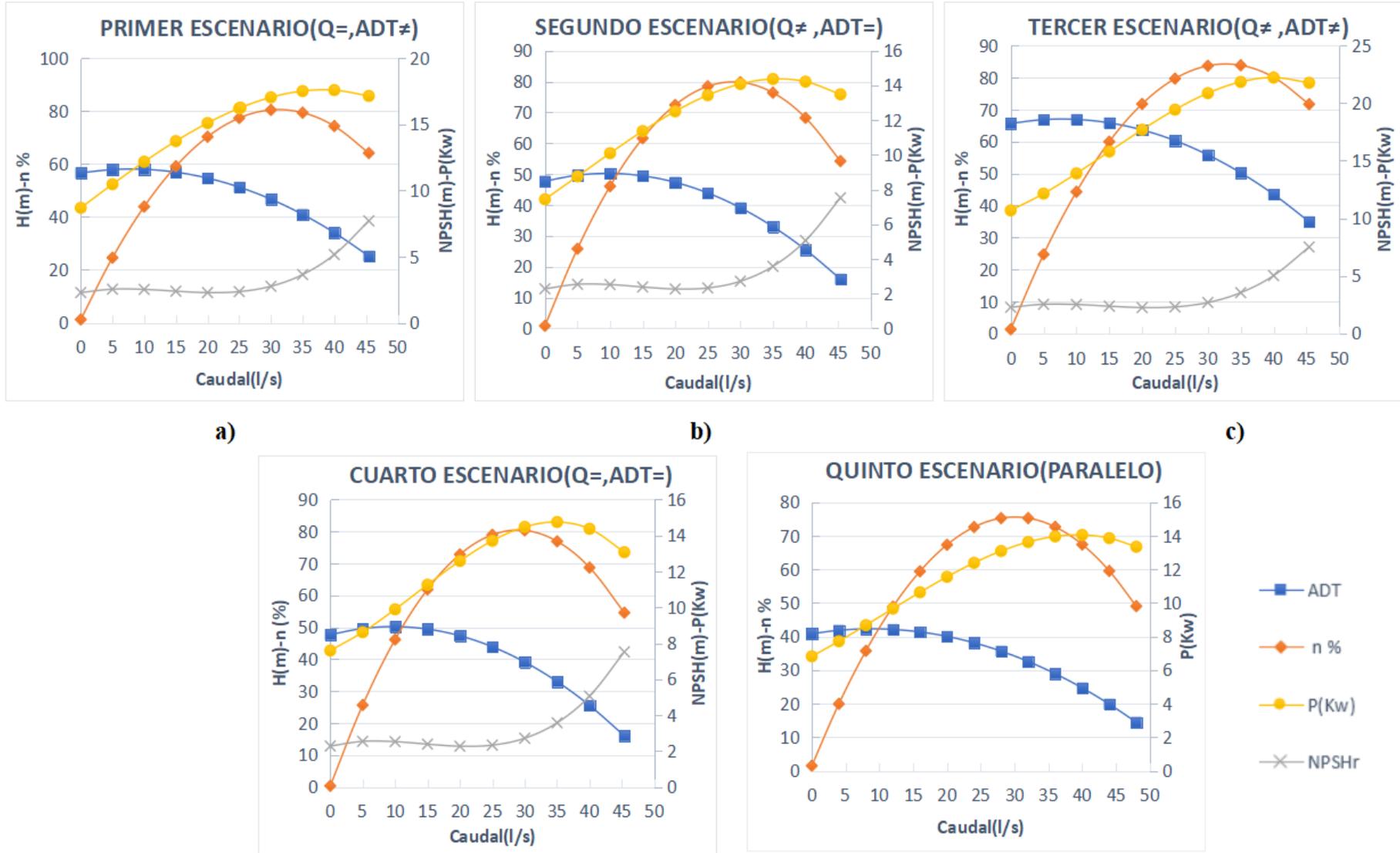


Figura 4.23: Curvas características: a) Primer, b) Segundo, c) Tercer, d) Cuarto, e) Quinto escenario

Con los valores de los cuatro curvas características del quinto escenario se trabajó la configuración de dos bombas en paralelo de iguales características donde los valores de  $Q$   $\eta$  ADT se duplicaron en la curva de ADT y los valores de  $Q$  vs  $\eta$  y se mantuvieron constantes en la curva de eficiencia, en la Figura 4.23 observamos las tres curvas características con sus respectivas ecuaciones.

Las ecuaciones en paralelo cumplen con el Método de áreas y son las que se usaron para determinar el costo de energía para el quinto escenario en configuración de paralelo.

## **4.9. Curvas características y los puntos de operación**

Con las curvas características de cada escenario y los requerimientos de  $Q$  y ADT para cada turno de riego que vienen a ser los puntos de operación se procedió a graficarlos que se muestran en la Figura 4.24.

La tendencia para los puntos de operación fue la siguiente: para el primer escenario los puntos de operación tienen tendencia vertical, el segundo escenario los puntos de operación tuvieron tendencia horizontal, el tercer escenario los puntos de operación no presentaron una tendencia, el cuarto escenario puntos de operación están muy cercanos formando casi un solo punto y el quinto escenario la tendencia de los puntos de operación fue horizontal.

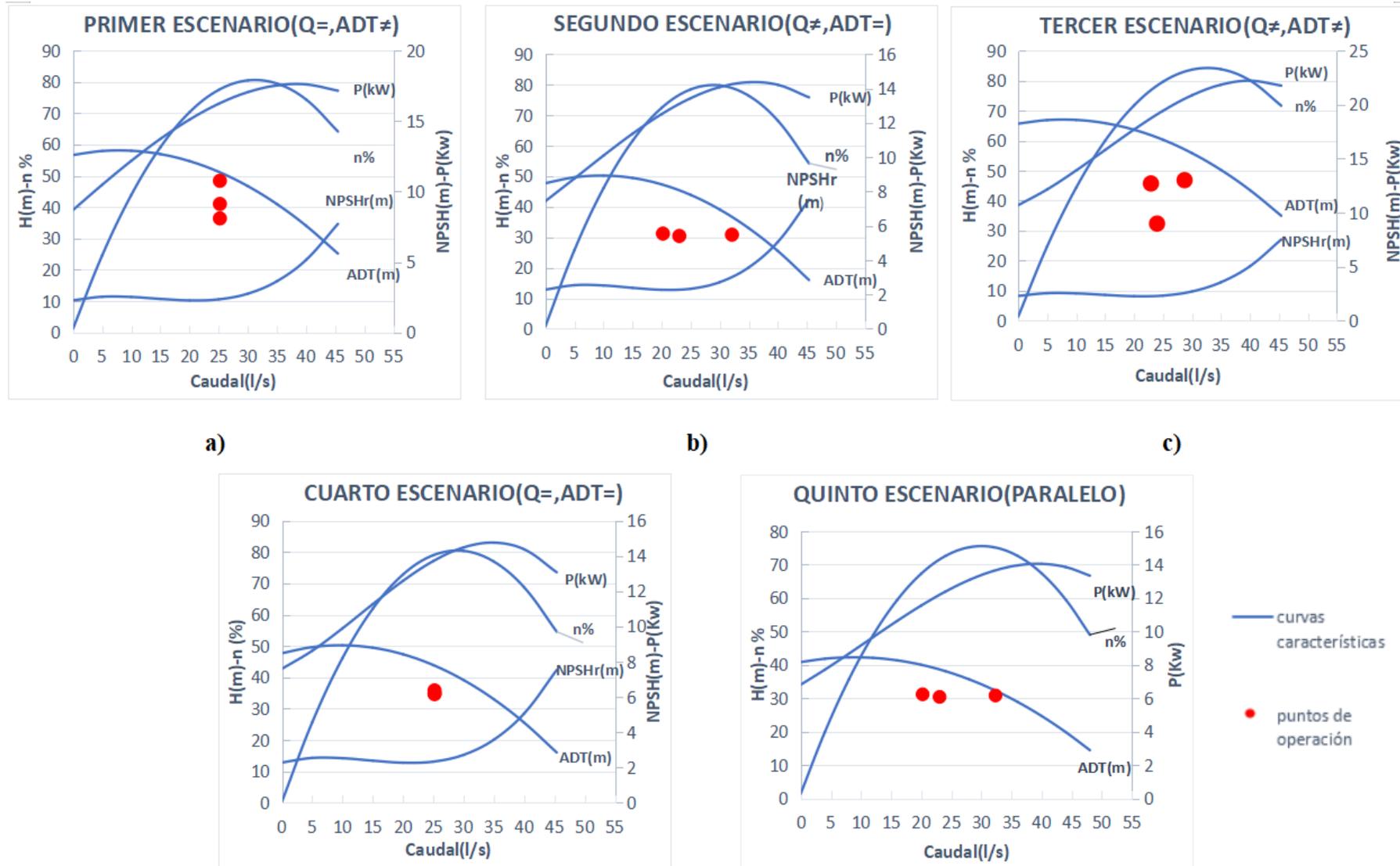


Figura 4.24: Curvas características y puntos operativos: a) Primer, b) Segundo, c) Tercer, d) Cuarto, e) Quinto escenario

## 4.10. Costos energéticos para el modo de control por estrangulación

Según los criterios planteados en la metodología se obtuvieron los siguientes datos para cada escenario. Se detalló los cálculos para el primer escenario para un mejor entendimiento y las horas de operación mensual para el segundo, tercer, cuarto y quinto escenario se encuentran en el Anexo 5.

### 4.10.1. Primer escenario (Caudal constantes/altura dinámica total variable)

En la Tabla 4.34 se muestra los tres turnos de riego con los requerimientos de Q, ADT y el área de cada turno.

**Tabla 4.34: Requerimiento de Q, ADT y áreas del primer escenario**

Turno	Q (l/s)	ADT (m)	Área (Ha)
I	25.2	36.42	5.73
II	25.2	48.41	5.73
III	25.2	41.03	5.73

Los pasos para el cálculo de costos energéticos son los siguientes:

#### Cálculo de proporciones de área para cada turno de riego

La suma de las tres áreas es 17.19 ha, este valor representa el 100 % de área total y para conocer el porcentaje de área de cada turno se realizó una regla de tres.

- I Turno:  $100 \times \frac{5,73}{17,19} = 33,33 \%$
- II Turno:  $100 \times \frac{5,73}{17,19} = 33,33 \%$
- III Turno:  $100 \times \frac{5,73}{17,19} = 33,33 \%$

Al ser el escenario de caudales constantes el porcentaje de áreas fue la misma para los tres turnos de riego.

### Cálculo de las horas de bombeo anual para cada turno de riego

Con los datos de volumen demandado por mes (VDM) en m<sup>3</sup> que son constantes para todos los escenarios y caudal de turno (QT) en m<sup>3</sup>/hr que variaron según el requerimiento del turno salió las horas de bombeo mensual que fue la división entre VDM y QT.

En la Tabla 4.35 se muestran las horas de bombeo mensual para el I, II y III turno.

**Tabla 4.35: Horas de bombeo mensual por turno del primer escenario**

Mes	Turno								
	I			II			III		
	VDM (m <sup>3</sup> )	QT (m <sup>3</sup> /hr)	HBM (hr)	VDM (m <sup>3</sup> )	QT (m <sup>3</sup> /hr)	HBM (hr)	VDM (m <sup>3</sup> )	QT (m <sup>3</sup> /hr)	HBM (hr)
Ene	18584.54	90.72	204.86	18584.54	90.72	204.86	18584.54	90.72	204.86
Feb	19208.21	90.72	211.73	19208.21	90.72	211.73	19208.21	90.72	211.73
Mar	16666.13	90.72	183.71	16666.13	90.72	183.71	16666.13	90.72	183.71
Abr	16786.04	90.72	185.03	16786.04	90.72	185.03	16786.04	90.72	185.03
May	14121.59	90.72	155.66	14121.59	90.72	155.66	14121.59	90.72	155.66
Jun	9862.76	90.72	108.72	9862.76	90.72	108.72	9862.76	90.72	108.72
Jul	9512.09	90.72	104.85	9512.09	90.72	104.85	9512.09	90.72	104.85
Ago	10701.1	90.72	117.96	10701.1	90.72	117.96	10701.1	90.72	117.96
Sep	12766.8	90.72	140.73	12766.8	90.72	140.73	12766.8	90.72	140.73
Oct	15080.79	90.72	166.23	15080.79	90.72	166.23	15080.79	90.72	166.23
Nov	15229.27	90.72	167.87	15229.27	90.72	167.87	15229.27	90.72	167.87
Dic	16586.2	90.72	182.83	16586.2	90.72	182.83	16586.2	90.72	182.83
Anual			1930.18			1930.18			1930.18

Al ser el escenario de caudal constante el caudal de turno para los tres turnos fue el mismo por lo cual las horas de bombeo mensual fueron constantes.

- I turno con un caudal de 25.20 l/s (90.72 m<sup>3</sup>/hr) la suma de las horas de bombeo mensuales es de 1930.18
- II turno con un caudal de 25.20 l/s (90.72 m<sup>3</sup>/hr) la suma de las horas de bombeo mensuales es de 1930.18
- III turno con un caudal de 25.20 l/s (90.72 m<sup>3</sup>/hr) la suma de las horas de bombeo mensuales es de 1930.18

Con la suma de las horas de bombeo mensuales se calculó las horas de bombeo anual para cada turno.

- I turno:  $1930,18 \times \frac{33,33}{100} = 643,39hr$
- II turno:  $1930,18 \times \frac{33,33}{100} = 643,39hr$
- III turno:  $1930,18 \times \frac{33,33}{100} = 643,39hr$

Al ser el escenario de caudal constante las horas de bombeo anual para los tres turnos fue el mismo.

### **Cálculo del ADT y n. bomba para cada turno de riego**

La “ADT” se calculó con la ecuación de la curva de ADT de 50 Hz para los tres turnos de riego.

$$ADT = -0,0233Q^2 + 0,3672Q + 56,649 \quad (4.6)$$

- I turno:  $-0,0233(25,20)^2 + 0,3672(25,20) + 56,649 = 51,11m$
- II turno:  $-0,0233(25,20)^2 + 0,3672(25,20) + 56,649 = 51,11m$
- III turno:  $-0,0233(25,20)^2 + 0,3672(25,20) + 56,649 = 51,11m$

La “ $\eta$ ” se calculó con la ecuación de la curva de eficiencia para los tres turnos de riego.

$$\eta_{bomba} = -0,0813Q^2 + 5,0795Q + 1,2264 \quad (4.7)$$

- I turno:  $-0,0813(25,20)^2 + 5,0795(25,20) + 1,2264 = 79,12\%$
- II turno:  $-0,0813(25,20)^2 + 5,0795(25,20) + 1,2264 = 79,12\%$
- III turno:  $-0,0813(25,20)^2 + 5,0795(25,20) + 1,2264 = 79,12\%$

Al ser el escenario de caudal constante el ADT y  $\eta_{bomba}$  de cada turno fue la misma.

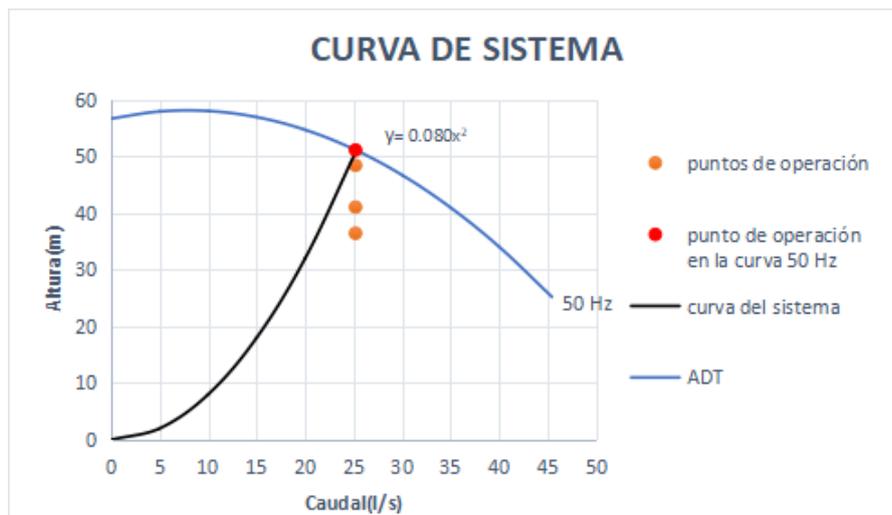
Con los puntos de operación de la curva de 50 Hz se graficó la curva del sistema, al ser los puntos de los tres turnos iguales solo se graficó una curva del sistema, donde se reemplazó el Q y la ADT para obtener el valor de K.

En la Tabla 4.36 se muestra la ecuación del sistema para hallar el valor de K y los datos de Q y H para la gráfica de la curva del sistema de los tres turnos de riego.

**Tabla 4.36: Valores de Q y H para la curva del sistema del primer escenario**

K	Q (l/s)	H (m)
	0	0
	5	2
	10	8
0.08	15	18
	20	32
	25	50
	25.2	50.8

En la Figura 4.25 observamos como los puntos de operación o requerimientos iniciales de turnos de riego se proyectaron a la curva de ADT, al ser el escenario de caudales constante solo se tuvo un punto de operación que es el punto de operación de la curva de 50 Hz.



**Figura 4.25: Curvas del sistema para los puntos de operación del primer escenario**

## Eficiencia del motor

La eficiencia del motor ( $\eta_{motor}$ ) es la que se encontró en la Figura 4.17 que con un valor de 93.20 % para los tres turnos de riego.

## Cálculo los costos energéticos para cada turno de riego

- I turno:

$$\text{Potencia de la red} = \frac{25,2 \times 51,11}{102 \times 0,79 \times 0,93} = 17,01kW$$

$$\text{Costo energético} = 17,01 \times 0,28 \times 643,39 = S/. 3010,07 \text{ año}$$

- II turno:

$$\text{Potencia de la red} = \frac{25,2 \times 51,11}{102 \times 0,79 \times 0,93} = 17,01kW$$

$$\text{Costo energético} = 17,01 \times 0,28 \times 643,39 = S/. 3010,07 \text{ año}$$

- III turno:

$$\text{Potencia de la red} = \frac{25,2 \times 51,11}{102 \times 0,79 \times 0,93} = 17,01kW$$

$$\text{Costo energético} = 17,01 \times 0,28 \times 643,39 = S/. 3010,07 \text{ año}$$

El costo energético total es la suma de los tres turnos:

$$\text{Costo energético total} = 3010,07 + 3010,07 + 3010,07 = S/. 9030,22 \text{ año}$$

Al tener los puntos de operación iguales, los costos energéticos tuvieron el mismo valor para los tres turnos de riego.

## Cálculo de la eficiencia energética

- I turno:  $\frac{79,12 \times 93,80}{100} = 74,22 \%$

- II turno:  $\frac{79,12 \times 93,80}{100} = 74,22 \%$

- III turno:  $\frac{79,12 \times 93,80}{100} = 74,22\%$

Al igual que los costos de energéticos la eficiencia energética es la misma para los tres turnos por tener iguales eficiencias de bomba y motor.

#### 4.10.2. Segundo escenario (Altura dinámica total contante/caudal variable)

En la Tabla 4.37 se muestran los valores de Q, ADT, áreas, porcentaje de áreas y las horas de bombeo anual de para cada turno de riego.

**Tabla 4.37: Porcentaje de áreas y requerimientos de Q y ADT del segundo escenario**

Turno	Q (l/s)	ADT (m)	Área (ha)	% Área	Horas de bombeo anual
I	23.05	30.43	5.24	30.48	643.25
II	32.33	30.86	7.35	42.76	643.28
III	20.23	31.21	4.6	26.76	643.4
Total			17.19	100	

Para determinar el ADT y n. bomba de los tres turnos se reemplazó los caudales de la Tabla 4.61 en las siguientes ecuaciones:

$$ADT = -0,0268Q^2 + 0,5162Q + 47,739$$

$$\eta_{bomba} = -0,0947Q^2 + 5,4738Q + 0,8161$$

Con los resultados de ADT que en la ecuación anterior se consiguió tener los puntos de operación para la curva de 50 Hz, además de la eficiencia de la bomba para cada turno que se muestran en la Tabla 4.38.

**Tabla 4.38: Puntos de operación en la curva de 50 Hz del segundo escenario**

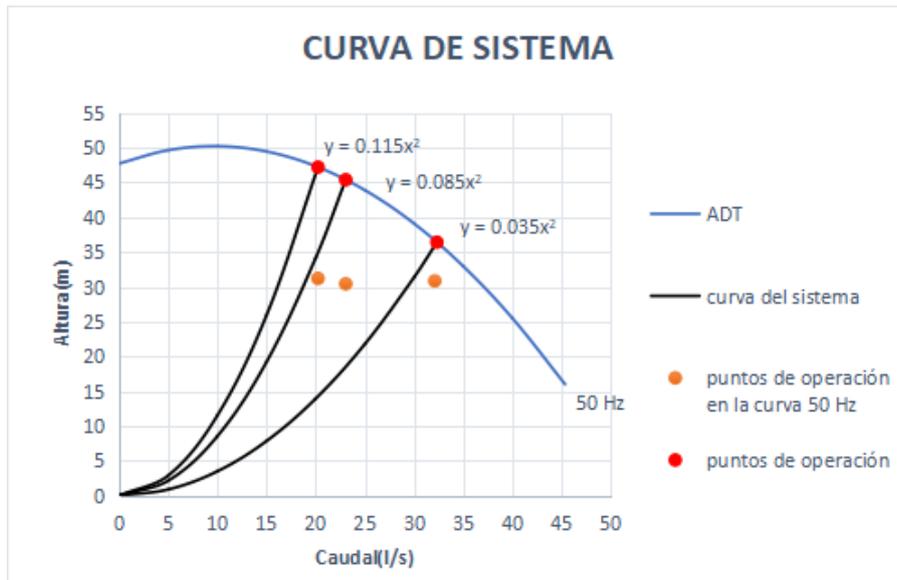
Turno	Q (l/s)	ADT (m)	$\eta$ bomba %
I	23.05	45.40	76.67
II	32.33	36.42	78.80
III	20.23	47.21	72.79

En la Tabla 4.39 se muestran las ecuaciones del sistema para hallar el valor de K y los datos de Q y H para la gráfica de curva del sistema de los tres turnos de riego.

**Tabla 4.39: Valores de Q y H para la curva del sistema del segundo escenario**

Turno	K	Q (l/s)	H (m)
1	0.085	0	0
		5	2.1
		10	8.5
		15	19.2
		20	34.2
		23	45.2
2	0.035	0	0
		5	0.9
		10	3.5
		15	7.8
		20	13.9
		25	21.8
		30	31.4
32	35.7		
3	0.115	0	0
		5	2.9
		10	11.5
		15	26
		20.2	47.1

En la Figura 4.26 observamos como los puntos de operación o requerimientos iniciales de turnos de riego se proyectaron a la curva de ADT, al ser el escenario de caudales variables se tuvieron tres puntos de operación en la curva de 50 Hz y tres curvas de sistema con su respectiva ecuación.



**Figura 4.26: Curvas del sistema para los puntos de operación del segundo escenario**

En la Tabla 4.40, se muestran los resultados de potencia y costos energéticos.

**Tabla 4.40: Costos energéticos por estrangulación del segundo escenario**

Parámetros	Turno I	Turno II	Turno III
Caudal (l/s)	23.05	32.33	20.23
Altura dinámica total (m)	45.4	36.42	47.21
Eficiencia de la bomba (%)	76.67	78.8	72.79
Eficiencia del motor (%)	92.1	92.1	92.1
Potencia de la red (kW)	14.53	15.9	13.97
S / kW - hr	0.28	0.28	0.28
Horas de bombeo anual	643.25	643.28	643.4
Costo energético (S/. año)	2569.96	2813.44	2471.27
Costos energéticos totales (S/. año)	7854.67		

El mayor costo energético fue del II turno con un valor de 2813.44 soles al año a pesar que la eficiencia de la bomba fue la más alta de los tres turnos con un valor de 78.80 %, posiblemente se debió a que el turno tiene el mayor caudal es decir una mayor área de riego.

### 4.10.3. Tercer escenario (Caudal variable/altura dinámica total variable)

En la Tabla 4.41 se muestran los valores de Q, ADT, áreas, porcentaje de áreas y las horas de bombeo anual de para cada turno de riego.

**Tabla 4.41: Porcentaje de áreas y requerimientos de Q y ADT para el tercer escenario**

Turno	Q (l/s)	ADT (m)	Área (ha)	% Área	Horas de bombeo anual
I	23.97	32.23	5.45	31.7	643.35
II	22.91	45.71	5.21	30.31	643.48
III	28.72	46.82	6.53	37.99	643.35
Total			17.19	100	

Para determinar el ADT y  $\eta_{bomba}$  de los tres turnos se reemplazó los caudales de la Tabla 4.61 en las siguientes ecuaciones:

$$ADT = -0,0226Q^2 + 0,3502Q + 65,657$$

$$\eta_{bomba} = -0,0776Q^2 + 5,0728Q + 1,317$$

Con los resultados de ADT que en la ecuación anterior se consiguió tener los puntos de operación para la curva de 50 Hz, además de la eficiencia de la bomba para cada turno que se muestran en la Tabla 4.42.

**Tabla 4.42: Puntos de operación en la curva de 50 Hz del tercer escenario**

Turno	Q (l/s)	ADT (m)	$\eta_{bomba}$ %
I	23.97	61.07	78.33
II	22.91	61.82	76.81
III	28.72	57.07	83

En la Tabla 4.43 se muestra las ecuaciones del sistema para hallar el valor de K y lo datos de Q y H para la gráfica de curva del sistema de los tres turnos de riego.

**Tabla 4.43: Valores de Q y H para la curva del sistema del tercer escenario**

Turno	K	Q (l/s)	H (m)
1	0.106	0	0
		5	2.7
		10	10.6
		15	23.9
		20	42.5
		23.8	60.2
2	0.118	0	0
		5	2.9
		10	11.8
		15	26.5
		20	47.1
		23	62.3
3	0.069	0	0
		5	1.7
		10	6.9
		15	15.6
		20	27.7
		25	43.2
		28.75	57.2

En la Figura 4.27 observamos como los puntos de operación o requerimientos iniciales de turnos de riego se proyectaron a la curva de ADT, al ser el escenario de caudales variables se tuvieron tres puntos de operación en la curva de 50 Hz y tres curvas de sistema con su respectiva ecuación.

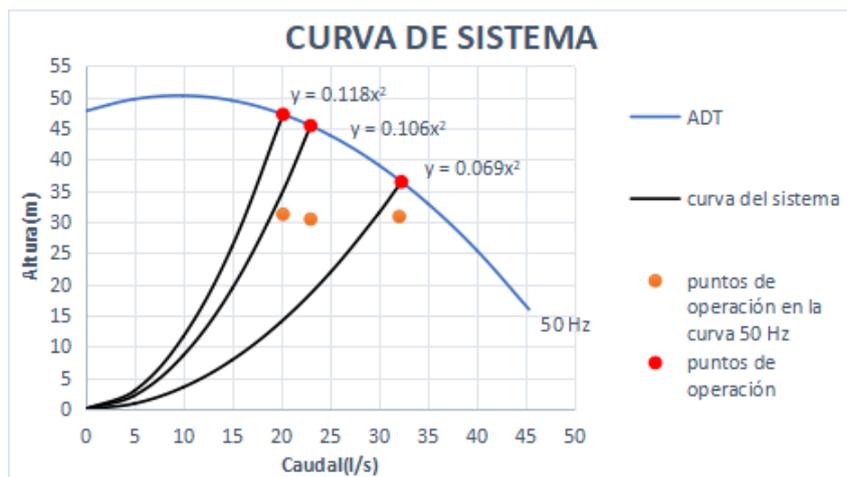


Figura 4.27: Curvas del sistema para los puntos de operación del tercer escenario

En la Tabla 4.44, se muestran los resultados de potencia y costos energéticos.

Tabla 4.44: Costos energéticos por estrangulación del tercer escenario

Parámetros	Turno I	Turno II	Turno III
Caudal (l/s)	23.97	22.91	28.72
Altura dinámica total (m)	61.07	61.82	57.07
Eficiencia de la bomba (%)	78.33	76.81	83
Eficiencia del motor (%)	93.2	93.2	93.2
Potencia de la red (kW)	19.66	19.4	20.77
S/. kW - hr	0.28	0.28	0.28
Horas de bombeo anual	643.35	643.48	643.35
Costo energético (S/. año)	3478	3432.43	3675.4
Costos energéticos totales (S/. año)	10585.83		

El mayor costo energético fue del III turno con un valor de 3675.40 soles al año a pesar que la eficiencia de la bomba fue la más alta de los tres turnos con un valor de 83 %, esto posiblemente se debió a que el turno tiene el mayor caudal es decir una mayor área de riego.

#### 4.10.4. Cuarto escenario (Caudal contante/altura dinámica total constante)

En la Tabla 4.45 se muestran los valores de Q, ADT, áreas, porcentaje de áreas con un valor de 33.33 % y las horas de bombeo anual de 640.40 para cada turno de riego.

**Tabla 4.45: Porcentaje de áreas y requerimientos de Q y ADT para el cuarto escenario**

Turno	Q (l/s)	ADT (m)	Área (ha)	% Área	Horas de bombeo anual
I	25.2	35.84	5.73	33.33	643.39
II	25.2	34.65	5.73	33.33	643.39
III	25.2	34.91	5.73	33.33	643.39
Total			17.19	100	

Para determinar el ADT y n. bomba de los tres turnos se reemplazó los caudales de la Tabla 4.61 en las siguientes ecuaciones:

$$ADT = -0,0268Q^2 + 0,518Q + 47,716$$

$$\eta_{bomba} = -0,0957Q^2 + 5,537Q + 0,3635$$

Con los resultados de ADT que en la ecuación anterior se consiguió tener los puntos de operación para la curva de 50 Hz, además de la eficiencia de la bomba para cada turno que se muestran en la Tabla 4.46.

**Tabla 4.46: Puntos de operación en la curva de 50 Hz del cuarto escenario**

Turno	Q (l/s)	ADT (m)	$\eta_{bomba}$ (%)
I	25.2	43.75	79.12
II	25.2	43.75	79.12
III	25.2	43.75	79.12

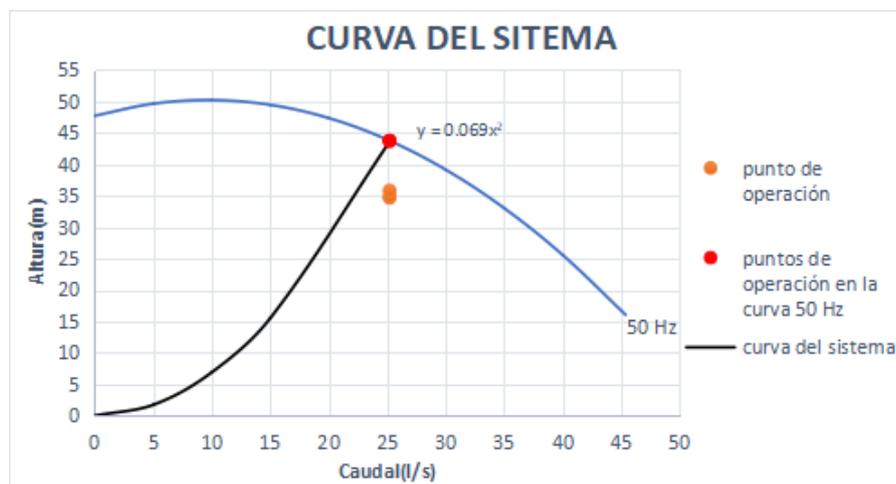
En la Tabla 4.47 se muestra la ecuación del sistema para hallar el valor de K y los datos de Q y H para la gráfica de la curva del sistema de los tres turnos de riego.

**Tabla 4.47: Valores de Q y H para la curva del sistema del cuarto escenario**

Turno	K	Q (l/s)	H (m)
1	0.069	0	0
		5	1.7
		10	6.9
		15	15.5
		25	43.1
		25.25	43.9

En la Figura 4.28 observamos como los puntos de operación o requerimientos iniciales de

turnos de riego se proyectaron a la curva de ADT, al ser el escenario de caudales constante solo se tuvo un punto de operación que es el punto de operación de la curva de 50 Hz con su respectiva ecuación.



**Figura 4.28: Curvas del sistema para los puntos de operación del cuarto escenario**

En la Tabla 4.48, se muestran los resultados de potencia y costos energéticos.

**Tabla 4.48: Costos energéticos por estrangulación del cuarto escenario**

Parámetros	Turno I	Turno II	Turno III
Caudal (l/s)	25.2	25.2	25.2
Altura dinámica total (m)	43.75	43.75	43.75
Eficiencia de la bomba (%)	79.12	79.12	79.12
Eficiencia del motor (%)	92.2	92.2	92.2
Potencia de la red (kW)	14.82	14.82	14.82
S / kW - hr	0.28	0.28	0.28
Horas de bombeo anual	643.39	643.39	643.39
Costo energético (S/. año)	2621.56	2621.56	2621.56
Costos energéticos totales (S/. año)	7864.69		

Los costos energéticos son los mismos para los tres turnos de riego porque solo se tiene un punto de operación.

#### 4.10.5. Quinto escenario (Bombas en paralelo)

En la Tabla 4.49 se muestran los valores de Q, ADT, áreas, porcentaje de áreas y las horas de bombeo anual de para cada turno de riego.

**Tabla 4.49: Porcentaje de áreas y requerimientos de Q y ADT para el quinto escenario**

Turno	Q (l/s)	ADT (m)	Área (ha)	% Área	Horas de bombeo anual
I	23.05	30.43	5.24	30.48	643.25
II	32.33	30.86	7.35	42.76	643.28
III	20.23	31.21	4.6	26.76	643.4
Total			17.19	100	

Para determinar el ADT y  $\eta_{bomba}$  de los tres turnos se reemplazó los caudales de la Tabla 4.61 en las siguientes ecuaciones:

$$ADT = -0,0182Q^2 + 0,3232Q + 40,848$$

$$\eta_{bomba} = -0,0822Q^2 + 4,933Q + 1,5139$$

Con los resultados de ADT que en la ecuación anterior se consiguió tener los puntos de operación para la curva de 50 Hz, además de la eficiencia de la bomba para cada turno que se muestran en la Tabla 4.50.

**Tabla 4.50: Puntos de operación en la curva de 50 Hz del quinto escenario**

Turno	Q (l/s)	ADT (m)	$\eta_{bomba}$ (%)
I	23.05	38.63	71.55
II	32.33	32.27	75.08
III	20.23	39.94	67.67

En comparación con las eficiencias de bombas de los demás escenarios en este quinto escenario los valores fueron muy bajos lo afectará los costos energéticos.

En la Tabla 4.51 se muestran las ecuaciones del sistema para hallar el valor de K y los datos de Q vs H para la gráfica de curva del sistema de los tres turnos de riego.

**Tabla 4.51: Valores de Q y H para la curva del sistema del quinto escenario**

Turno	K	Q (l/s)	H (m)
1	0.073	0	0
		3	0.7
		6	2.6
		9	5.9
		12	10.5
		15	16.4
		22.9	38.1
2	0.031	0	0
		7	1.5
		14	6.1
		21	13.6
		28	24.2
		32	32.1
3	0.098	0	0
		3	0.9
		6	3.5
		9	7.9
		12	14.1
		15	22
		20.3	40.2

En la Figura 4.29 observamos como los puntos de operación o requerimientos iniciales de turnos de riego se proyectaron a la curva de ADT, al ser el escenario de caudales variables se tuvieron tres puntos de operación en la curva de 50 Hz y tres curvas de sistema con su respectiva ecuación.

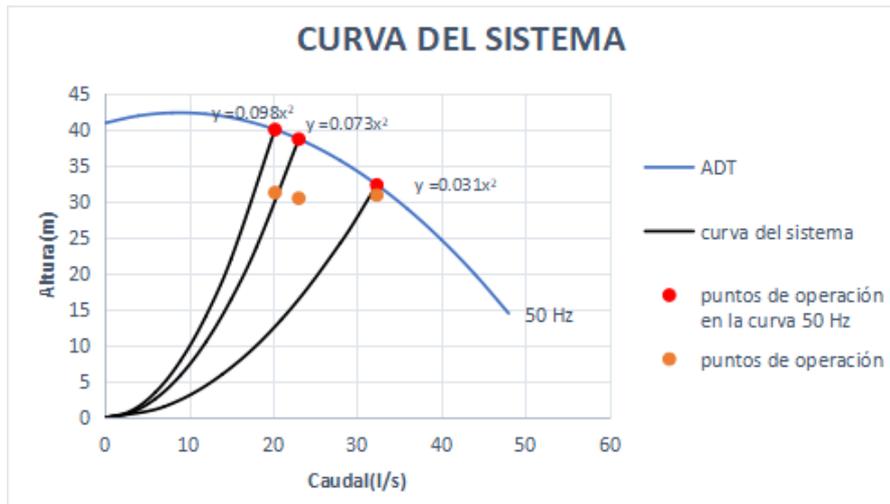


Figura 4.29: Curvas del sistema para los puntos de operación del quinto escenario

En la Tabla 4.52, se muestran los resultados de potencia y costos energéticos.

Tabla 4.52: Costos energéticos por estrangulación del quinto escenario

Parámetros	Turno I	Turno II	Turno III
Caudal (l/s)	23.05	32.33	20.23
Altura dinámica total (m)	38.63	32.27	39.94
Eficiencia de la bomba (%)	71.55	75.08	67.67
Eficiencia del motor (%)	90.4	90.4	90.4
Potencia de la red (kW)	13.5	15.07	12.95
S / . kW - hr	0.28	0.28	0.28
Horas de bombeo anual	643.25	643.28	643.4
Costo energético (S/. año)	2805.89	2666.24	2291.11
Costos energéticos totales (S/. año)	7763.24		

El mayor costo energético fue del II turno con un valor de 2666.24 soles al año posiblemente a que el turno tiene la altura dinámica total más alta con un valor de 32.33 m.

En la Tabla 4.53, se muestra las eficiencias energéticas para los cinco escenarios.

**Tabla 4.53: Eficiencia energética para los cinco escenarios por estrangulación**

Escenario	Turno	$\eta$ (%)			Promedio
		Bomba	Motor	Energética	
1°	I	79.12	93.8	74.22	74.22
	II	79.12	93.8	74.22	
	III	79.12	93.8	74.22	
2°	I	76.67	92.1	70.62	70.08
	II	78.8	92.1	72.58	
	III	72.79	92.1	67.04	
3°	I	78.33	93.2	73	73.98
	II	76.81	93.2	71.59	
	III	83	93.2	77.36	
4°	I	79.12	92.2	72.95	72.95
	II	79.12	92.2	72.95	
	III	79.12	92.2	72.95	
5°	I	71.55	90.4	64.68	64.57
	II	75.08	90.4	67.87	
	III	67.67	90.4	61.17	

El mayor valor de eficiencia energética por turno fue del tercer escenario para el III turno con un valor de 77.36 % y esto se debió a que el valor de eficiencia de la bomba es el más y el menor valor de eficiencia por turno fue del quinto escenario para el III turno con un valor de 61.17 % porque presento el valor más bajo de eficiencia de la bomba con un valor de 67.67 %.

El mayor valor de eficiencia promedio fue del primer escenario con un valor de 74.22 % escenario debido a que la eficiencia del motor fue la mayor para los tres turnos de riego y los valores se mantuvieron constantes y el menor valor de eficiencia promedio fue del quinto escenario con un valor de 64.57 % porque los valores de eficiencia de bomba para los tres turnos son los más bajos en comparación con los demás escenarios.

## **4.11. Costos energéticos para modos de control para el VDF**

Según los criterios planteados en la metodología se obtuvieron los siguientes datos para cada escenario de bucle abierto y bucle cerrado. Se utilizó el variador de frecuencia Grundfos modelo CUE 3X380-500V, pero al tener cada escenario diferente se optó por especificar un variador por cada escenario teniendo en cuenta que todos los escenarios tuvieron una eficiencia de variador del 98 %, lo cual es mayor al porcentaje que recomienda (United States Department of Agriculture), en el Anexo 6 se muestra las especificaciones eléctricas de los variadores.

### **4.11.1. Costos energéticos para el modo de control de bucle abierto**

Se usó este modo de control para los tres primeros escenarios, el primer escenario se detalló al igual que en los resultados de la sección 4.10, para un mejor entendimiento.

#### **Primer escenario (Caudal contante/altura dinámica total variable)**

Los datos  $Q$ ,  $ADT$  y áreas de cada turno son los mismos de la Tabla 4.58.

**Cálculo del % área para cada turno de riego** Los cálculos son los mismos que en los resultados de la sección 4.10

**Cálculo de las horas de bombeo anual para cada turno de riego** Los cálculos son los mismos que en los resultados de la sección 4.10

**Cálculo de la eficiencia con los datos base de la curva original** Al tener los valores de  $Q_1$ ,  $ADT_1$  y  $P_1$  para la velocidad de 50 Hz hallados en los resultados de la sección 4.10 se calculó la  $\eta_1$  para los diferentes caudales que se muestra en la Tabla 4.54.

**Tabla 4.54: Valores de Q, ADT, P y  $\eta$  para la velocidad de 50 Hz del primer escenario**

Q (l/s)	ADT (m)	P (kW)	$\eta$ (%)
0	56.65	8.69	0
5	57.9	10.47	27.1
10	57.99	12.17	46.71
15	56.91	13.73	60.95
20	54.67	15.1	71.01
25	51.27	16.22	77.47
30	46.7	17.04	80.58
35	40.96	17.52	80.24
40	34.06	17.59	75.94
45.45	25.21	17.15	65.51

**Cálculo de la velocidad para cada punto de operación** Usando las leyes de afinidad y los valores Q, ADT, P y  $\eta$  se determinó a que velocidad debía girar el motor para cada turno de riego o punto de operación que se muestra en la Tabla 4.55.

**Tabla 4.55: Velocidades para los puntos de operación del primer escenario**

Turno	Q (l/s)	ADT (m)	Velocidad (Hz)
I	25.2	36.42	43.6
II	25.2	48.41	49
III	25.2	41.03	45.7

En la Tabla 4.56 se muestra los valores de:  $Q_2$ ,  $ADT_2$ ,  $P_2$  y  $\eta_2$ ;  $Q_3$ ,  $ADT_3$ ,  $P_3$  y  $\eta_3$ ;  $Q_4$ ,  $ADT_4$ ,  $P_4$  y  $\eta_4$  y  $Q_5$ ,  $ADT_5$ ,  $P_5$  y  $\eta_5$  para las velocidades de:

- N2 = 60 Hz
- N3 = 49 Hz
- N4 = 45.7 Hz
- N5 = 43.6 Hz

Donde N3, N4 y N5 representa la velocidad de giro para cada punto de operación y con respecto a la velocidad de N2 se graficó por ser la más usada en el Perú.

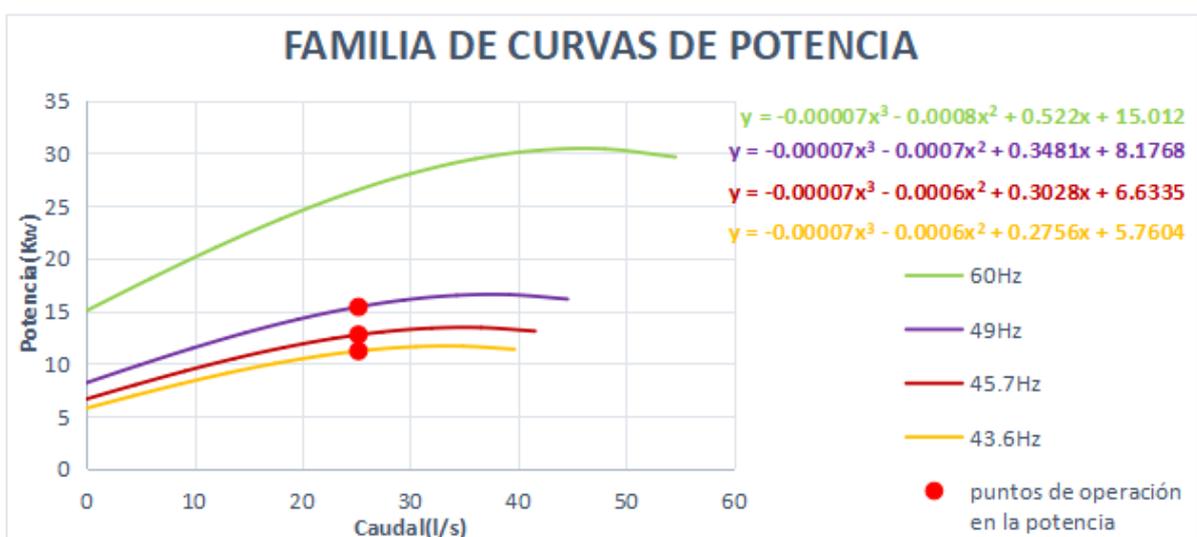
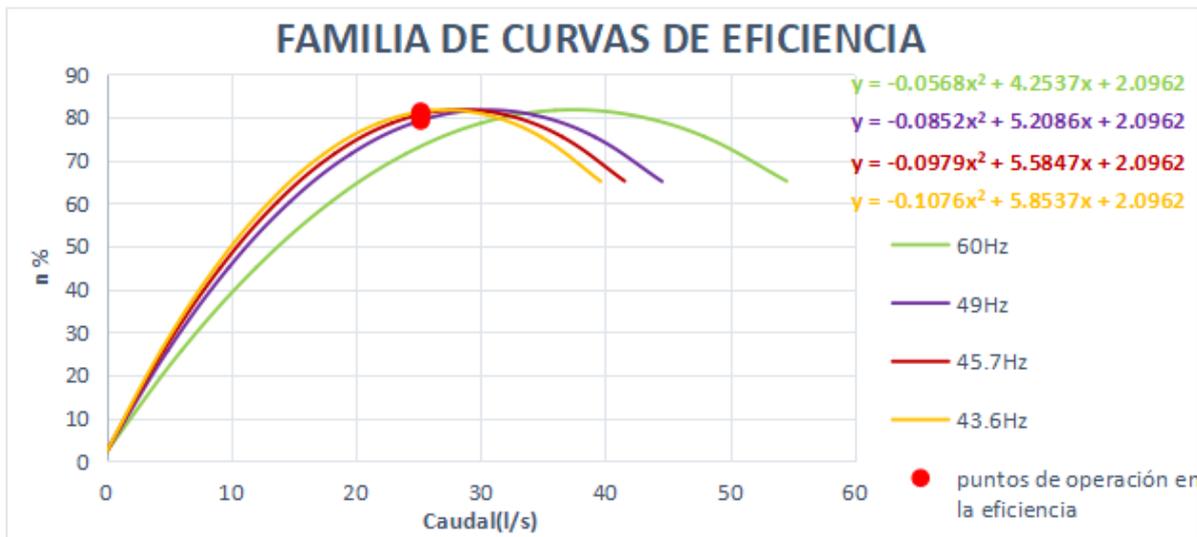
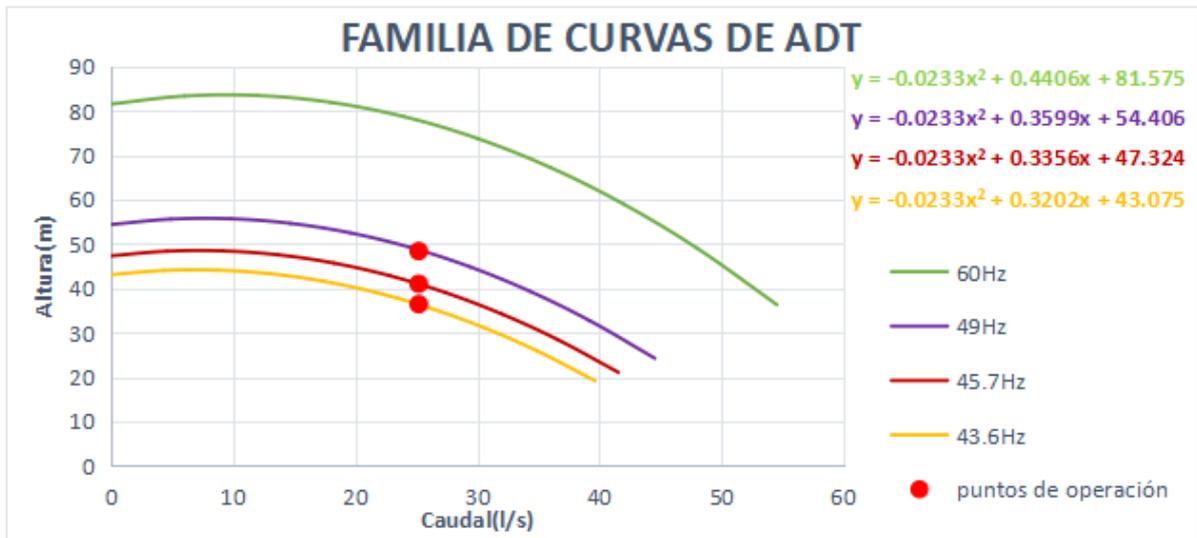
**Tabla 4.56: Valores de Q, ADT, P y  $\eta$  para las velocidades de 60, 49, 45.7 y 43.6 Hz del primer escenario**

N (Hz)	Q (l/s)	ADT (m)	P (kW)	$\eta$ (%)
N2=60	0	81.57	15.01	0
	6	83.38	18.1	27.1
	12	83.51	21.03	46.71
	18	81.96	23.73	60.95
	24	78.73	26.09	71.01
	30	73.82	28.03	77.47
	6	67.24	29.45	80.58
	42	58.98	30.27	80.24
	48	49.04	30.39	75.94
	54.54	36.3	29.63	65.51
N3=49	0	54.41	8.18	0
	4.9	55.61	9.86	27.1
	9.8	55.69	11.46	46.71
	14.7	54.66	12.92	60.95
	19.6	52.51	14.21	71.01
	24.5	49.24	15.27	77.47
	29.4	44.85	16.04	80.58
	34.3	39.34	16.49	80.24
	39.2	32.71	16.55	75.94
	44.54	24.21	16.14	65.51
N4=45.7	0	47.32	6.63	0
	4.57	48.37	8	27.1
	9.14	48.45	9.29	46.71
	13.71	47.55	10.48	60.95
	18.28	45.67	11.53	71.01
	22.85	42.83	12.38	77.47
	27.42	39.01	13.01	80.58
	31.99	34.22	13.37	80.24
	36.56	28.45	13.43	75.94
	41.54	21.06	13.09	65.51
N5=43.6	0	43.07	5.76	0
	4.36	44.03	6.94	27.1
	8.72	44.1	8.07	46.71
	13.08	43.28	9.1	60.95
	17.44	41.57	10.01	71.01
	21.8	38.98	10.75	77.47
	26.16	35.51	11.3	80.58
	30.52	31.14	11.61	80.24
	34.88	25.9	11.66	75.94
	39.63	19.17	11.37	65.51

**Cálculo de las ecuaciones de ADT, potencia y eficiencia** Con los valores de la Tabla anterior se halló la familia de curvas y ecuaciones para las cuatro velocidades que se muestran en la Figura 4.30 donde los valores de los tres turnos de: “ADT” y “P” si cambiaron en la fa-

milia de curvas de ADT y potencia y la  $\eta$  no varió considerablemente en la familia de curvas de eficiencia.

Los resultados de estas gráficas nos muestran que el punto de operación con mayor valor de potencia fue el de la curva de 49 Hz del II turno esto se debió a que la potencia básicamente es Q por ADT, al ser constante el caudal para los tres turnos el único valor que influyó para que tuviera un valor alto fue el ADT que fue el valor más alto de los tres turnos con un valor de 48.41m.



**Figura 4.30:** Familia de curvas de ADT, potencia y eficiencia para las velocidades de 60, 49, 45.7, 43.6 Hz del primer escenario

**Cálculo de la eficiencia del motor** Con las ecuaciones de la familia de eficiencia se halló la eficiencia de la bomba para los tres turnos.

- I turno:  $\eta_{bomba} = -0,1076(25,20)^2 + 5,8537(25,20) + 2,0962 = 81,28 \%$
- II turno:  $\eta_{bomba} = -0,0852(25,20)^2 + 5,2086(25,20) + 2,0962 = 79,25 \%$
- III turno:  $\eta_{bomba} = -0,0979(25,20)^2 + 5,5847(25,20) + 2,0962 = 80,66 \%$

**Eficiencia del motor** La eficiencia del motor es la misma que en los resultados de la sección 4.12.

**Eficiencia del VDF** La eficiencia del variador está en la Figura 4.31 con un valor de rendimiento a plena carga ( $\eta_{VDF}$ ) de 98 % para los tres turnos de riego.

DATOS ELÉCTRICOS	
Potencia nominal - P2:	22 kilovatios
Frecuencia de red:	50/60 Hz
Voltaje nominal:	380-440 / 441-500 V
Corriente nominal:	44-40 A
Consumo máximo de corriente:	44 A
Rendimiento a plena carga:	98%
Clase de envoltente (IEC 34-5):	IP20
Protección del motor:	SI
Protección térmica:	externo
Longitud del cable:	150/300 m

Figura 4.31: Datos eléctricos del VDF del primer escenario

**Calculo de los costos energéticos para cada turno de riego** Con todos los datos obtenidos en los pasos anteriores se pudo calcular los costos energéticos para los tres turnos de riego.

- I turno:

$$\text{Potencia de la red} = \frac{25,2 \times 36,42}{102 \times 0,81 \times 0,93 \times 0,98} = 12,04 kW$$

$$\text{Costo energético} = 12,04 \times 0,28 \times 643,39 = S/. 2130.79 \text{ año}$$

- II turno:

$$\text{Potencia de la red} = \frac{25,2 \times 48,41}{102 \times 0,79 \times 0,93 \times 0,98} = 16,42kW$$

$$\text{Costo energético} = 16,42 \times 0,28 \times 643,39 = S/. 2904.89 \text{ año}$$

- III turno:

$$\text{Potencia de la red} = \frac{25,2 \times 41,03}{102 \times 0,80 \times 0,93 \times 0,98} = 13,67kW$$

$$\text{Costo energético} = 13,67 \times 0,28 \times 643,39 = S/. 2418.92 \text{ año}$$

El costo energético total es la suma de los tres turnos para diferentes velocidades y es:

$$\text{Costo energético total} = 2130,79 + 2904,89 + 2418,92 = S/. 7454.6 \text{ año}$$

Los resultados de mayores costos energéticos fueron para el II turno-49Hz con un valor de 2904.89 soles al año, posiblemente porque tuvo el mayor valor de potencia además de presentar el menor valor de eficiencia, mientras que el menor costo energético fue del I turno-43.6Hz con un valor de 21 soles que tuvo el menor valor de potencia y el mayor valor de eficiencia de la bomba.

### **Cálculo de la eficiencia energética**

- I turno:  $\frac{81,28 \times 93,80 \times 98}{100 \times 100} = 74,72 \%$
- II turno:  $\frac{79,25 \times 93,80 \times 98}{100 \times 100} = 72,85 \%$
- III turno:  $\frac{80,66 \times 93,80 \times 98}{100 \times 100} = 74,15 \%$

### **Segundo escenario (Presión contantes/caudal variable)**

En la Tabla 4.57 se muestran los valores de Q, ADT, P y  $\eta$ .

**Tabla 4.57: Valores de Q, ADT, P y  $\eta$  para la velocidad de 50 Hz del segundo escenario**

Q (l/s)	ADT (m)	P (kW)	$\eta$ (%)
0	47.74	7.44	0
5	49.65	8.76	27.79
10	50.22	10.09	48.78
15	49.45	11.37	63.97
20	47.34	12.51	74.21
25	43.89	13.44	80.05
30	39.11	14.08	81.66
35	32.98	14.37	78.75
40	25.51	14.22	70.35
45.37	15.99	13.49	52.74

Con las leyes de afinidad y los datos de Q, ADT, P y  $\eta$  se determino la velocidad para los tres puntos de operación que se muestran en la Tabla 4.58.

**Tabla 4.58: Velocidades para los puntos de operación del segundo escenario**

Turno	Q (l/s)	ADT (m)	Velocidad (Hz)
I	23.05	30.43	42.5
II	32.33	30.86	47.4
III	20.23	31.21	41.9

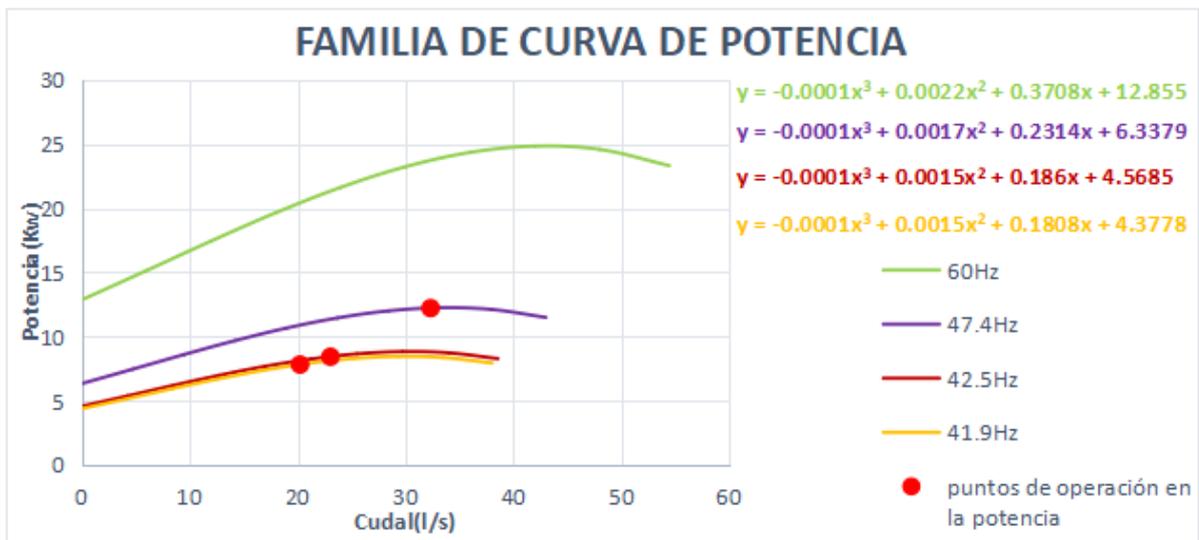
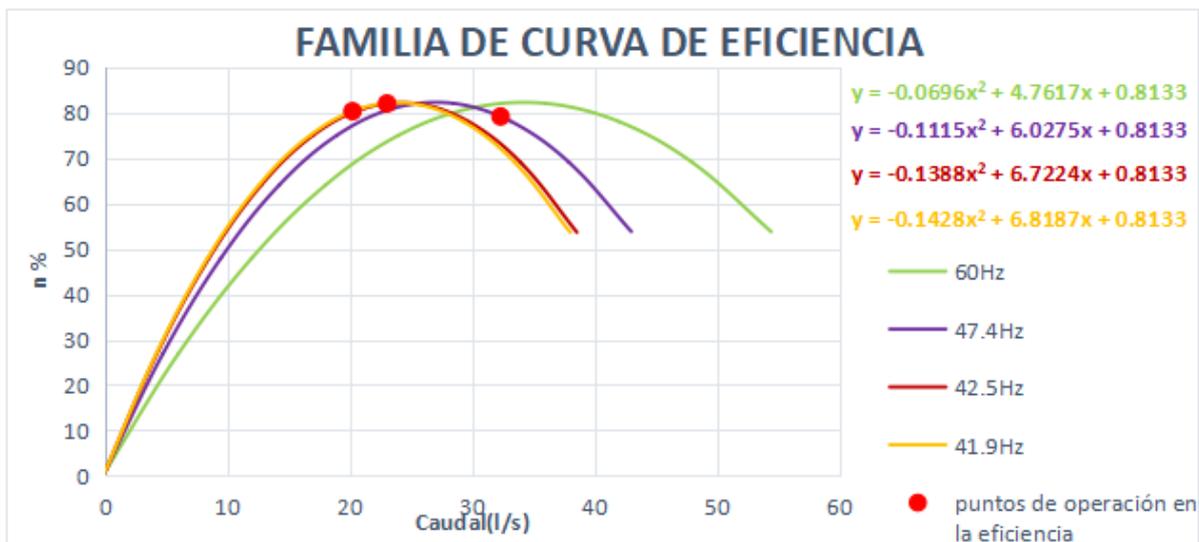
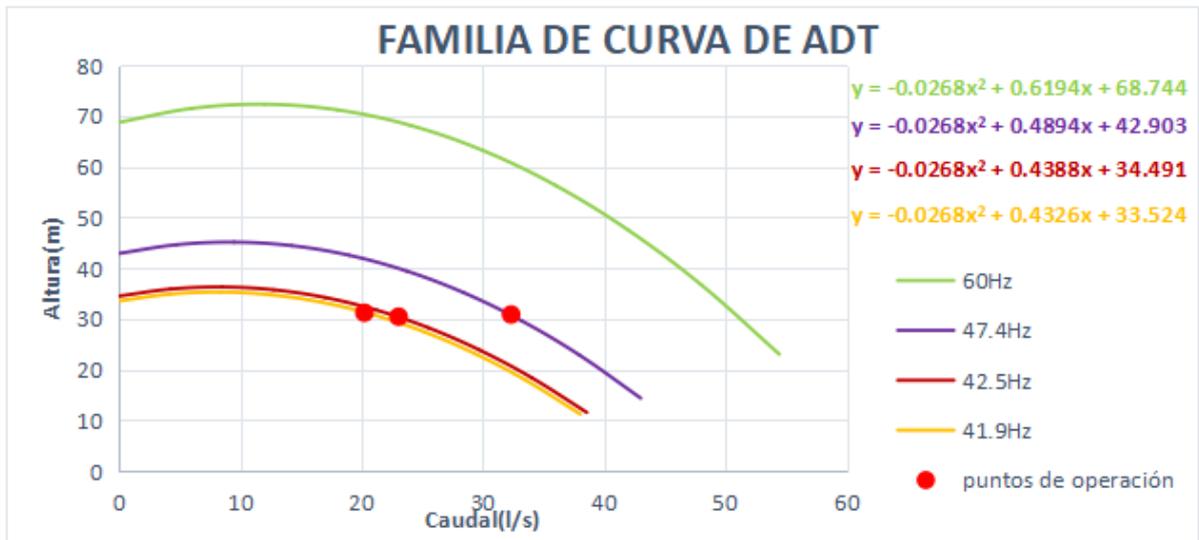
En la Tabla 4.59 se muestra los valores de Q, ADT, P y  $\eta$  para las velocidades de 60, 47.4, 42.5 y 41.9 Hz.

**Tabla 4.59: Valores de Q, ADT, P y  $\eta$  para las velocidades de 60, 47.4, 42.5 y 41.9 Hz del segundo escenario**

N (Hz)	Q (l/s)	ADT (m)	P (kW)	$\eta$ (%)
N2=60	0	68.74	12.85	0
	6	71.5	15.14	27.79
	12	72.32	17.44	48.78
	18	71.21	19.65	63.97
	24	68.17	21.62	74.21
	30	63.21	23.22	80.05
	36	56.31	24.34	81.66
	42	47.49	24.83	78.75
	48	36.73	24.57	70.35
	54.44	23.03	23.31	52.74
N3=47.4	0	42.9	6.34	0
	4.74	44.62	7.46	27.79
	9.48	45.13	8.6	48.78
	14.22	44.44	9.69	63.97
	18.96	42.55	10.66	74.21
	23.7	39.45	11.45	80.05
	28.44	35.14	12	81.66
	33.18	29.64	12.24	78.75
	37.92	22.92	12.11	70.35
	43.01	14.37	11.49	52.74
N4=42.5	0	34.49	4.57	0
	4.25	35.87	5.38	27.79
	8.5	36.28	6.2	48.78
	12.75	35.73	6.98	63.97
	17	34.21	7.68	74.21
	21.25	31.71	8.25	80.05
	25.5	28.25	8.65	81.66
	29.75	23.83	8.82	78.75
	34	18.43	8.73	70.35
	38.56	11.55	8.28	52.74
N5=41.9	0	33.52	4.38	0
	4.19	34.87	5.15	27.79
	8.38	35.27	5.94	48.78
	12.57	34.73	6.69	63.97
	16.76	33.25	7.36	74.21
	20.95	30.82	7.91	80.05
	25.14	27.46	8.29	81.66
	29.33	23.16	8.46	78.75
	33.52	17.91	8.37	70.35
	38.02	11.23	7.94	52.74

Con los valores de la Tabla 4.59 se halló la familia de curvas y ecuaciones para las cuatro velocidades que se muestran en la Figura 4.32, donde los valores de “ADT” y “ $\eta$ ” no cambiaron en la familia de curvas de ADT y “ $\eta$ ”, mientras que la “P” si varió considerablemente

en la familia de curvas de potencia.



**Figura 4.32:** Familia de curvas de ADT, eficiencia y potencia para las velocidades de 60, 48.1, 46.3, 41 Hz del segundo escenario

Los resultados de estas graficas nos muestran que el punto de operación con mayor valor de

potencia fue el de la curva de 47.4 Hz del II turno esto se debió a que la potencia básicamente es caudal por ADT, al ser constante el ADT para los tres turnos el único valor que influyo para que tuviera un valor alto fue el caudal que fue el valor más alto de los tres turnos con un valor de 32.33 m.

En la Tabla 4.60, se muestran los resultados de potencia y costos energéticos.

**Tabla 4.60: Costos energéticos con VDF/bucle abierto del segundo escenario**

Parámetros	Turno I-42.5Hz	Turno II-47.4Hz	Turno III-41.9H
Caudal (l/s)	23.05	32.33	20.23
Altura dinámica total (m)	30.43	30.86	31.21
Eficiencia de la bomba (%)	82.02	79.14	80.31
Eficiencia del motor (%)	92.1	92.1	92.1
Eficiencia del variador (%)	98	98	98
Potencia de la red(kW)	9.29	13.69	8.54
S /. kW - hr	0.28	0.28	0.28
Horas de bombeo anual	643.25	643.28	643.4
Costo energético (S/. año)	1643.17	2422.47	1510.87
Costos energéticos totales (S/. año)		5576.51	

Los resultados de mayores costos energéticos fueron para el II turno - 47.4Hz con un valor de S/. 2422.47 al año, posiblemente porque tuvo el mayor valor de potencia además de presentar el menor valor de eficiencia, mientras que el menor costo energético fue del III tuno-41.9Hz con un valor de 1510.87 soles que tuvo el menor valor de potencia.

### **Tercer escenario (Caudal variable/altura dinámica total variable)**

En la Tabla 4.61 se muestran los valores de Q, ADT, P y  $\eta$ .

**Tabla 4.61: Valores de Q, ADT, P y  $\eta$  para la velocidad de 50 Hz del segundo escenario**

Q (l/s)	ADT (m)	P (kW)	$\eta$ (%)
0	65.66	10.69	0
5	66.84	12.15	26.98
10	66.9	13.9	47.19
15	65.83	15.8	61.27
20	63.62	17.69	70.51
25	60.29	19.43	76.05
30	55.82	20.86	78.69
35	50.23	21.84	78.91
40	43.51	22.22	76.8
45.41	34.96	21.77	71.5

Con las leyes de afinidad y los datos de Q, ADT, P y  $\eta$  se determino la velocidad para los tres puntos de operación que se muestran en la Tabla 4.62.

**Tabla 4.62: Velocidades para los puntos de operación del tercer escenario**

Turno	Q (l/s)	ADT (m)	Velocidad (Hz)
I	23.97	32.33	38.6
II	22.91	45.71	44
III	28.72	46.82	46.2

En la Tabla 4.63 se muestra los valores de Q, ADT, P y  $\eta$  para las velocidades de 60, 46.2, 44.4 y 38.6 Hz.

**Tabla 4.63: Valores de Q, ADT, P y  $\eta$  para las velocidades de 60, 46.2, 44.4 y 38.6 Hz del tercer escenario**

N (Hz)	Q (l/s)	ADT (m)	P (kW)	$\eta$ (%)
N2=60	0	94.55	18.47	0
	6	96.25	20.99	26.98
	12	96.33	24.02	47.19
	18	94.79	27.3	61.27
	24	91.61	30.57	70.51
	30	86.81	33.58	76.05
	36	80.39	36.05	78.69
	42	72.33	37.74	78.91
	48	62.65	38.39	76.8
	54.49	50.34	37.61	71.5
N3=46.2	0	56.06	8.43	0
	4.62	57.07	9.58	26.98
	9.24	57.12	10.97	47.19
	13.86	56.2	12.46	61.27
	18.48	54.32	13.96	70.51
	23.1	51.47	15.33	76.05
	27.72	47.66	16.46	78.69
	32.34	42.88	17.23	78.91
	36.96	37.14	17.53	76.8
	41.96	29.85	17.17	71.5
N4=44	0	50.84	7.28	0
	4.4	51.76	8.28	26.98
	8.8	51.81	9.47	47.19
	13.2	50.97	10.77	61.27
	17.6	49.27	12.06	70.51
	22	46.69	13.24	76.05
	26.4	43.23	14.22	78.69
	30.8	38.9	14.89	78.91
	35.2	33.69	15.14	76.8
	39.96	27.07	14.83	71.5
N5=38.6	0	39.13	4.92	0
	3.86	39.84	5.59	26.98
	7.72	39.87	6.4	47.19
	11.58	39.23	7.27	61.27
	15.44	37.92	8.14	70.51
	19.3	35.93	8.94	76.05
	23.16	33.27	9.6	78.69
	27.02	29.94	10.05	78.91
	30.88	25.93	10.22	76.8
	35.06	20.83	10.01	71.5

Con los valores de la Tabla anterior se halló la familia de curvas y ecuaciones para las cuatro velocidades que se muestran en la Figura 4.33, donde los valores de “ADT”, “ $\eta$ ” y “P” si variaron en la familia de curvas de ADT, eficiencia y potencia.

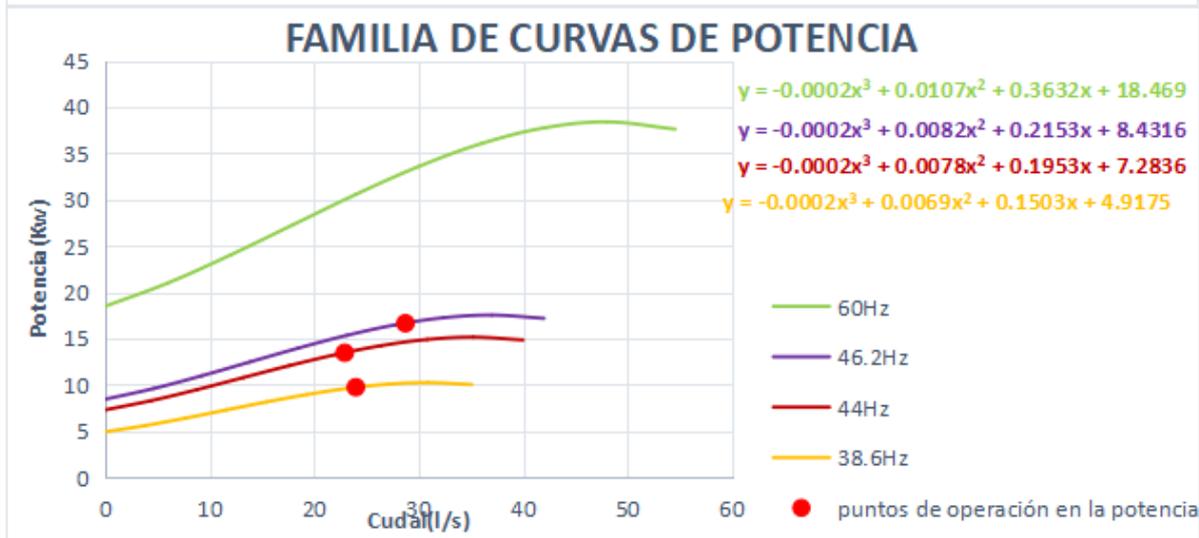
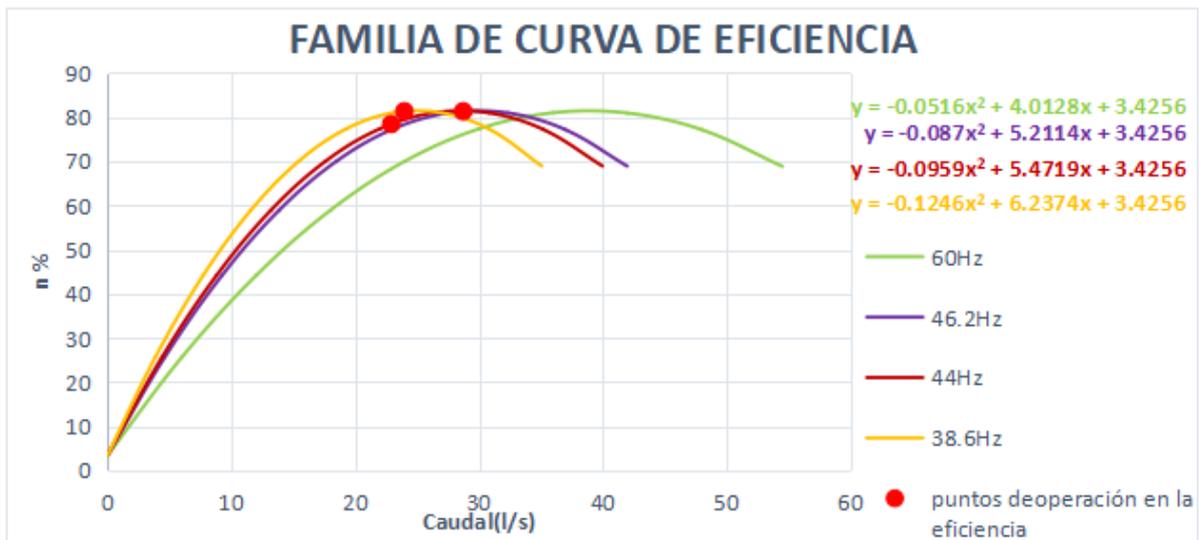
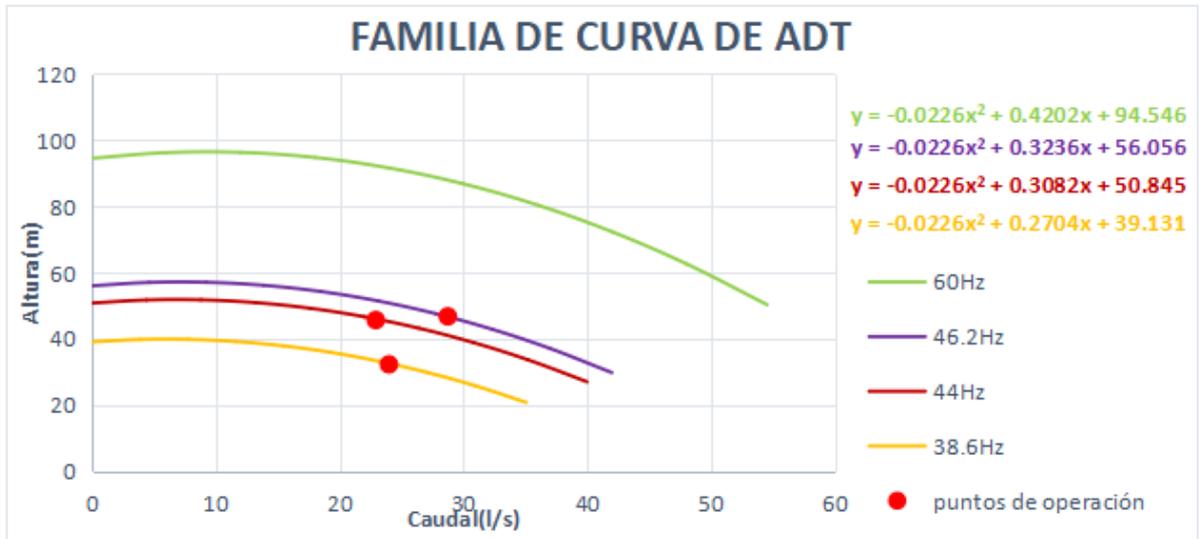


Figura 4.33: Familia de curvas de eficiencia para las velocidades de 60, 46.2, 44 y 38.6 Hz del tercer escenario

Los resultados de estas gráficas nos muestran que el punto de operación con mayor valor de potencia fue el de la curva de 46.2 Hz del III turno esto se debió a que el ADT y Q fueron los más alto de los tres turnos.

En la Tabla 4.64, se muestran los resultados de potencia y costos energéticos.

**Tabla 4.64: Costos energéticos por estrangulación del tercer escenario**

Parámetros	Turno I-38.6Hz	Turno II-44Hz	Turno III-46.2Hz
Caudal (l/s)	23.97	22.91	28.72
Altura dinámica total (m)	32.33	45.71	46.82
Eficiencia de la bomba (%)	81.35	78.45	81.34
Eficiencia del motor (%)	93.2	93.2	93.2
Eficiencia del variador (%)	98	98	98
Potencia de la red(kW)	10.23	14.33	17.75
S /. kW -hr	0.28	0.28	0.28
Horas de bombeo anual	643.35	643.48	643.35
Costo energético (S/. año)	1809.17	2535.46	3139.59
Costos energéticos totales (S/. año)		7484.22	

Los resultados de mayores costos energéticos fueron para el III turno-46.2Hz con un valor de S/. 3139.59 al año, posiblemente porque tuvo el mayor valor de potencia, mientras que el menor costo energético fue del I turno-38.6Hz con un valor de S/. 1809.17 que tuvo el menor valor de potencia.

En la Tabla 4.65, se muestra las eficiencias energéticas para los tres turnos de riego.

**Tabla 4.65: Eficiencia energética para los tres primeros escenarios con VDF/bucle abierto**

Escenario	Turno	$\eta$ (%)				
		Bomba	Motor	VDF	Energética	Promedio
1°	I	81.28	93.8	98	74.72	73.9
	II	79.25	93.8	98	72.85	
	III	80.66	93.8	98	74.15	
2°	I	82.02	92.1	98	74.03	72.65
	II	79.14	92.1	98	71.43	
	III	80.31	92.1	98	72.49	
3°	I	81.35	93.2	98	74.3	73.42
	II	78.45	93.2	98	71.65	
	III	81.34	93.2	98	74.29	

La mayor eficiencia por turno fue del primer escenario del I turno, esta dependió de la eficiencia del motor pues era la más alta con un valor de 93.8 % y que la eficiencia de la bomba también era alta con un valor de 81.28 % pero sin ser la más alta lo que hizo que se tuviera un valor de 74.72 % de eficiencia energética por turno, y el mayor valor de eficiencia en promedio fue también del primer escenario con un valor de 73.90 %.

#### 4.11.2. Costos energéticos para el modo de control de bucle cerrado

Los resultados de costos energéticos para el segundo y tercer escenario se muestran a continuación. Los valores de Q, ADT, P y  $\eta$  para las velocidades de 60 y 50 Hz fueron halladas en el punto anterior de bucle abierto.

##### Segundo escenario (Altura dinámica total contante/caudal variable)

**Presión constante** De la Tabla 4.38 se registró el valor máximo de Q que perteneció al turno I con un valor de 32.33 l/s y un ADT de 36.42 m, este último valor representó la presión constante para cualquier caudal, los puntos de la recta para presión constante se muestran en la Tabla 4.66.

**Tabla 4.66: Puntos de la recta para presión constante del segundo escenario**

Q (l/s)	ADT (m)
0	36.42
10	36.42
20	36.42
30	36.42
35	36.42

Con la línea de tendencia que nos proporcionó Excel se sacó la ecuación de la función lineal para la presión constante:

$$y = 36,42; ADT = 36,42$$

Donde “y” representa el valor de ADT y al no tener un valor de “x” que represente el Q tenemos el ADT constante para los caudales iniciales de los tres turnos de riego, con los Q y ADT tenemos los puntos de operación en la recta de presión constante que se muestran en la Tabla 4.67, además de sus respectivas velocidades.

**Tabla 4.67: Puntos de operación en la recta de presión constante del segundo escenario**

Turno	Q (l/s)	ADT (m)	Velocidad (Hz)
I	23.05	36.42	45.7
II	32.33	36.42	50
III	20.23	36.42	44.8

En la Tabla 4.68 se muestra las ecuaciones del sistema para hallar el valor de K y los datos de Q y H para la gráfica de curva del sistema.

**Tabla 4.68: Valores de Q y H para la curva del sistema para presión constante del segundo escenario**

Turno	K	Q (l/s)	H (m)
1	0.069	0	0
		5	1.7
		10	6.9
		15	15.4
		20	27.4
		23	36.3
		25.2	43.5
2	0.035	0	0
		5	0.9
		10	3.5
		15	7.8
		20	13.9
		25	21.8
		30	31.4
		32	35.7
3	0.089	0	0
		5	2.2
		10	8.9
		15	20
		20	35.6
		22.68	45.8

En la Figura 4.34 se muestra los requerimientos iniciales o puntos de operación que se proyectaron en la recta de presión constante.

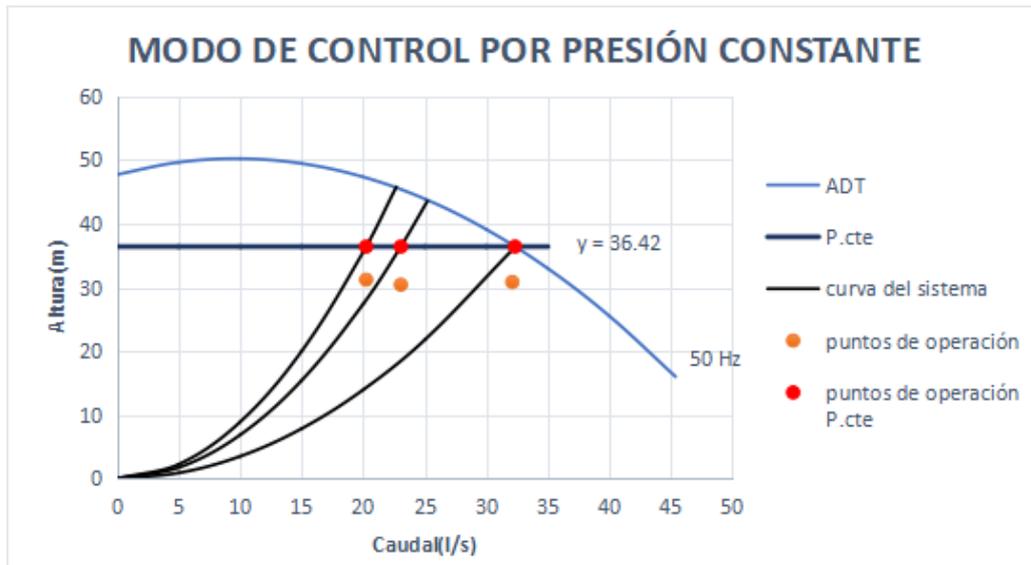


Figura 4.34: Gráfica para el modo de control de presión constante del segundo escenario

En la Tabla 4.69 se muestra los valores de Q, ADT, P y  $\eta$  para las velocidades de 45.7 y 44.8 Hz.

Tabla 4.69: Valores de Q, ADT, P y  $\eta$  para las velocidades de 45.7 y 44.8 Hz del segundo escenario

N (Hz)	Q (l/s)	ADT (m)	P (kW)	$\eta$ (%)
N2=45.7 Hz	0	39.88	5.68	0
	4.57	41.48	6.69	27.79
	9.14	41.95	7.71	48.78
	13.71	41.31	8.68	63.97
	18.28	39.55	9.55	74.21
	22.85	36.67	10.26	80.05
	27.42	32.67	10.75	81.66
	31.99	27.55	10.97	78.75
	36.56	21.31	10.86	70.35
	41.47	13.36	10.3	52.74
N3=44.8Hz	0	38.33	5.35	0
	4.48	39.86	6.3	27.79
	8.96	40.32	7.26	48.78
	13.44	39.7	8.18	63.97
	17.92	38.01	9	74.21
	22.4	35.24	9.67	80.05
	26.88	31.39	10.13	81.66
	31.36	26.47	10.34	78.75
	35.84	20.48	10.23	70.35
	40.65	12.84	9.7	52.74

Con los valores de la Tabla anterior se halló la familia de curvas y ecuaciones para las cuatro velocidades que se muestran en la Figura 4.35, donde los valores de “ADT” y “ $\eta$ ” no cambiaron en la familia de curvas de ADT y eficiencia y “P” si varió considerablemente en la

familia de curvas de potencia para la curva de 50 Hz.

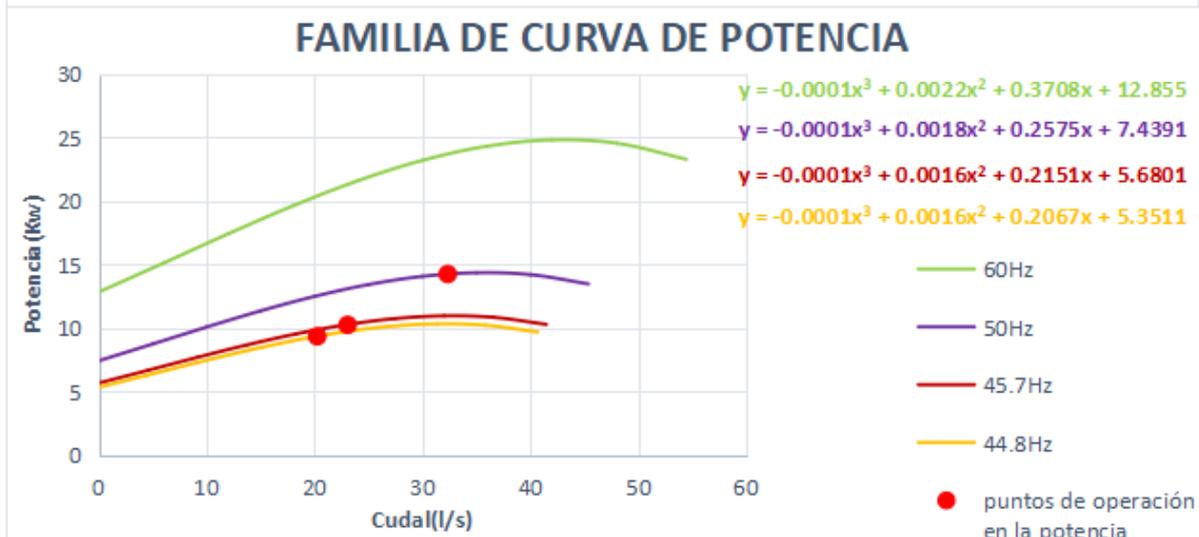
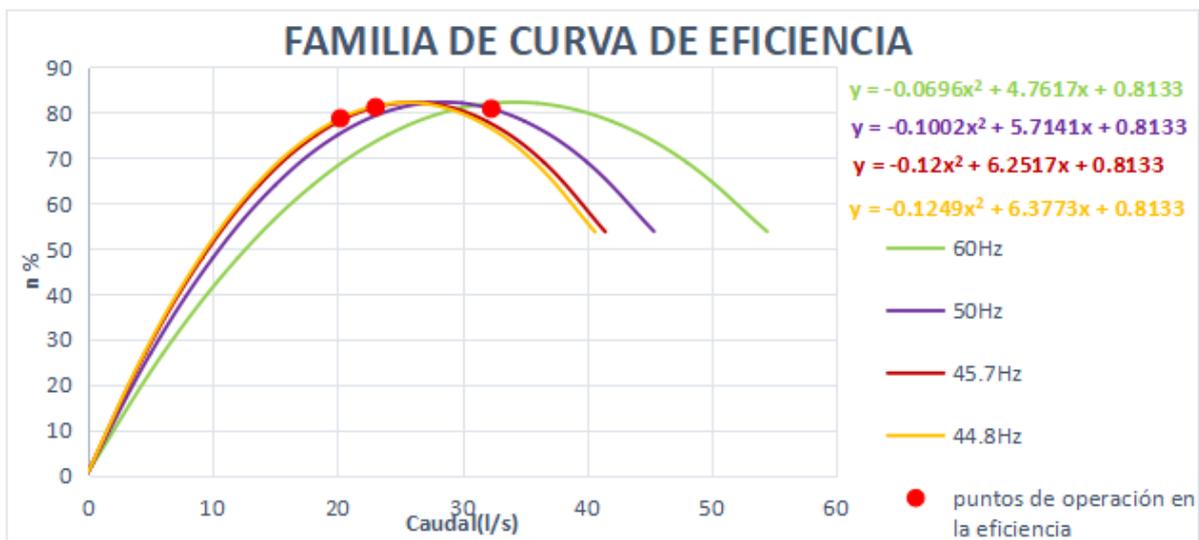
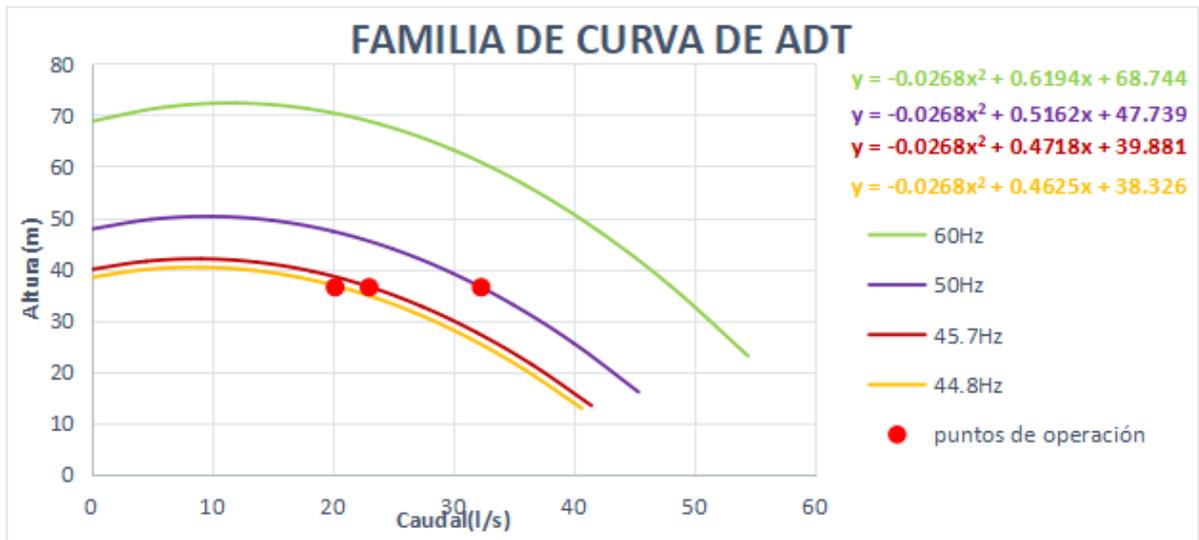


Figura 4.35: Familia de curvas de eficiencia para las velocidades de 60, 50, 45.7 y 44.8 Hz del segundo escenario

En la Tabla 4.70, se muestran los resultados de potencia y costos energéticos.

**Tabla 4.70: Costos energéticos para modo de regulación por VDF/bucle cerrado de presión constante del segundo escenario**

Parámetros	Turno I-45.7Hz	Turno II-50Hz	Turno III-44.8Hz
Caudal (l/s)	23.05	32.33	20.23
Altura dinámica total (m)	36.42	36.42	36.42
Eficiencia de la bomba (%)	81.16	80.82	78.71
Eficiencia del motor (%)	92.1	92.1	92.1
Eficiencia del variador (%)	98	98	98
Potencia de la red(kW)	11.23	15.82	10.17
S /. kW - hr	0.28	0.28	0.28
Horas de bombeo anual	643.25	643.28	643.4
Costo energético (S/. año)	1987.25	2799.2	1798.79
Costos energéticos totales (S/. año)		6585.24	

**Presión diferencial lineal** Con la Tabla 4.38 se registró el valor máximo de Q que pertenece al turno I con un valor de 32.33 l/s y un ADT de 36.42 m y con la Tabla 4.37 se registró el segundo punto que pertenece al turno III con un valor de 20.23 l/s y un ADT de 31.21 m, con estos dos puntos de Q y ADT se graficó la recta de presión diferencial lineal, en la Tabla 4.71 se muestra los puntos de la recta para la presión diferencial lineal.

**Tabla 4.71: Puntos de la recta para presión diferencial lineal del segundo escenario**

Q (l/s)	ADT (m)
20.23	31.21
32.33	36.42

Con la línea de tendencia que nos proporcionó Excel se sacó la ecuación de la función polinómica de primer grado para la presión diferencial lineal:

$$y = 0,4302X + 22,507 \longrightarrow ADT = 0,4302Q + 22,507$$

Donde “y” representa el valor de ADT y “x” que representa el Q, remplazando los caudales iniciales de los tres turnos de riego se obtuvo el ADT para la recta de presión diferencial lineal que se muestran en la Tabla 4.72, además de sus respectivas velocidades.

**Tabla 4.72: Puntos de operación en la recta de presión diferencial lineal del segundo escenario**

Turno	Q (l/s)	ADT (m)	Velocidad (Hz)
I	23.05	32.42	43.6
II	32.33	36.42	50
III	20.23	31.21	41.8

En la Tabla 4.73 se muestra las ecuaciones del sistema para hallar el valor de K y los datos de Q y H para la gráfica de curva del sistema.

**Tabla 4.73: Valores de Q y H para la curva del sistema para presión diferencial lineal del segundo escenario**

Turno	K	Q (l/s)	H (m)
1	0.061	0	0
		5	1.5
		10	6.1
		15	13.7
		20	24.4
		25	38.1
		26.4	42.5
2	0.035	0	0
		5	0.9
		10	3.5
		15	7.8
		20	13.9
		25	21.8
		30	31.4
3	0.076	0	0
		5	1.9
		10	7.6
		15	17.2
		20	30.5
		24.1	44.3

En la Figura 4.36 se muestra los requerimientos iniciales o puntos de operación que se proyectaron en la recta de presión diferencial lineal, donde el punto de operación de III turno no

se ve porque tiene el mismo valor que el punto de operación en presión diferencial lineal.

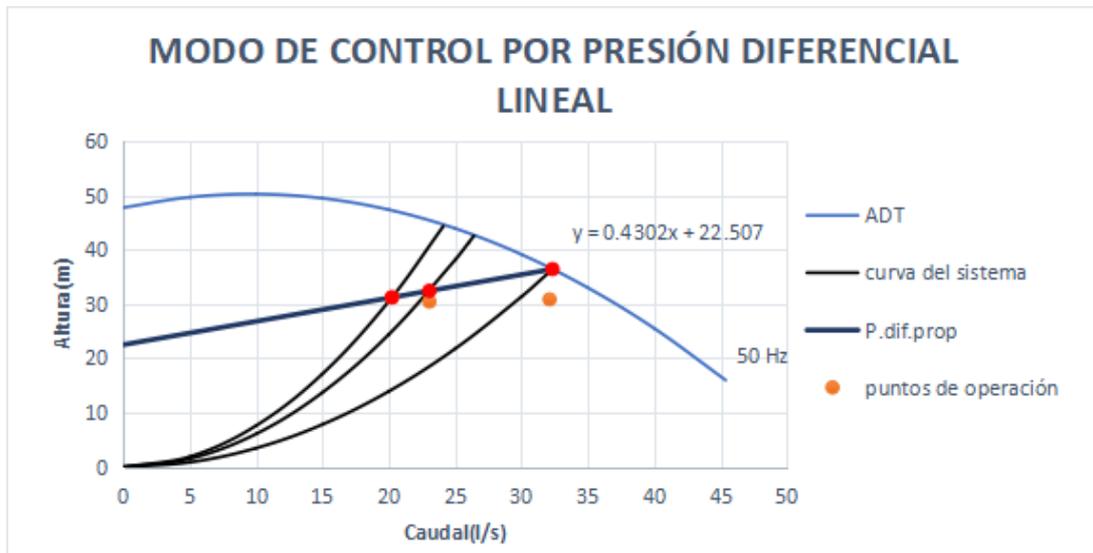


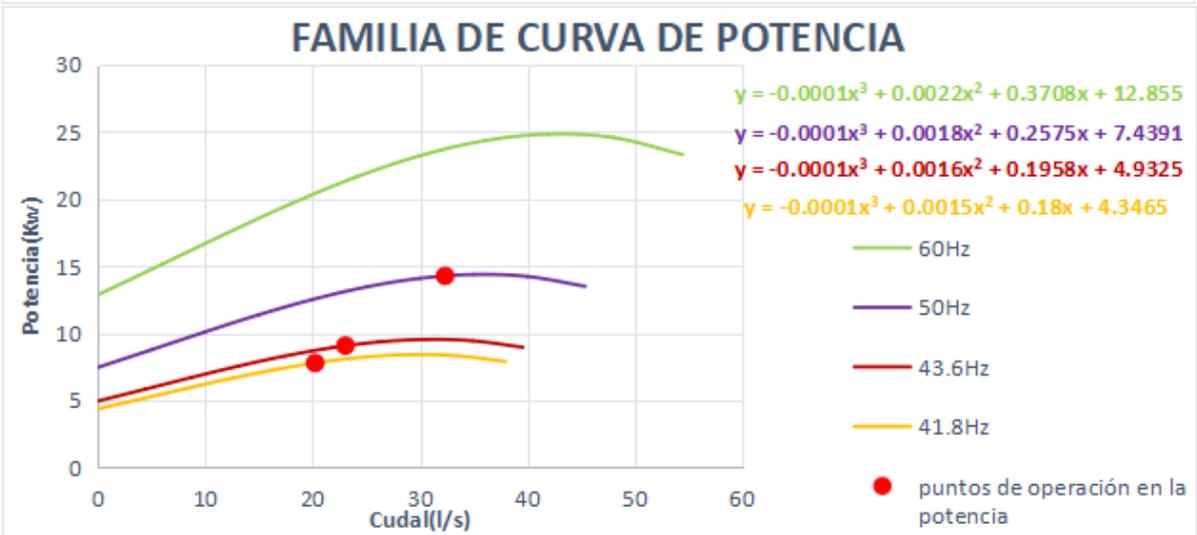
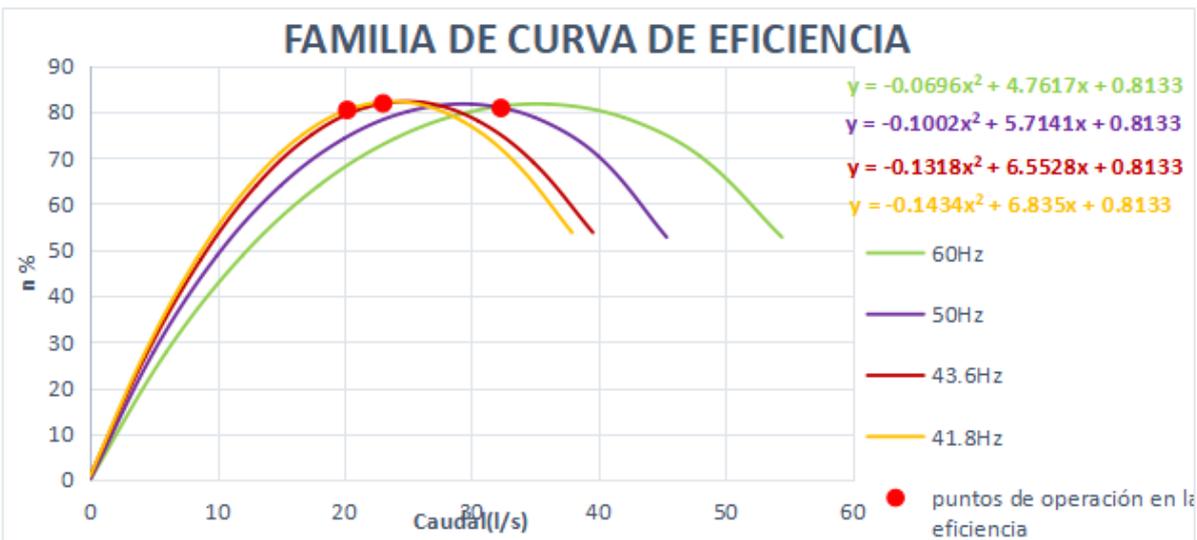
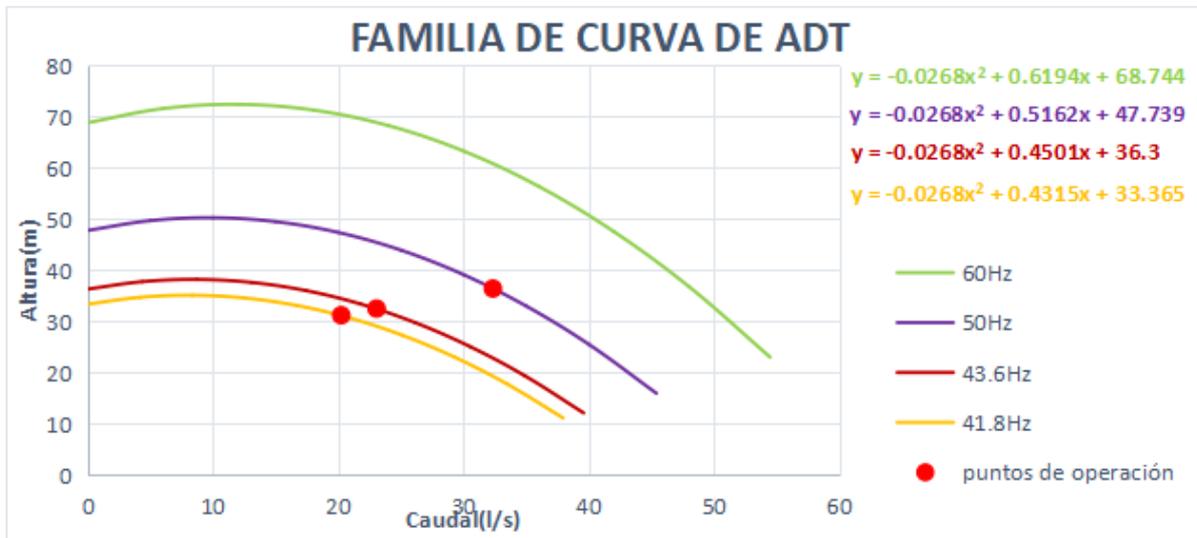
Figura 4.36: Gráfica para presión diferencial lineal del segundo escenario

En la Tabla 4.74 se muestra los valores de Q, ADT, P y  $\eta$  para las velocidades de 43.6 y 41.8 Hz.

Tabla 4.74: Valores de Q, ADT, P y  $\eta$  para las velocidades de 43.6 y 41.8 Hz del segundo escenario

N (Hz)	Q (l/s)	ADT (m)	P (kW)	$\eta$ (%)
N2=43.6	0	36.3	4.93	0
	4.36	37.75	5.81	27.79
	8.72	38.19	6.69	48.78
	13.08	37.6	7.54	63.97
	17.44	36	8.29	74.21
	21.8	33.38	8.91	80.05
	26.16	29.73	9.34	81.66
	30.52	25.07	9.53	78.75
	34.88	19.4	9.43	70.35
	39.56	12.16	8.94	52.74
N3=41.8	0	38.33	5.35	0
	4.48	39.86	6.3	27.79
	8.96	40.32	7.26	48.78
	13.44	39.7	8.18	63.97
	17.92	38.01	9	74.21
	22.4	35.24	9.67	80.05
	26.88	31.39	10.13	81.66
	31.36	26.47	10.34	78.75
	35.84	20.48	10.23	70.35
	40.65	12.84	9.7	52.74

Con los valores de la Tabla anterior se halló la familia de curvas y ecuaciones para las cuatro velocidades que se muestran en la Figura 4.37, donde los valores de “ADT” y “ $\eta$ ” no variaron mucho en la familia de curvas de ADT y eficiencia y “P” si varió considerablemente en la familia de curvas de potencia.



**Figura 4.37: Familia de curvas de ADT, potencia y eficiencia para las velocidades de 60,50,43.6 y 41.8 Hz del segundo escenario**

En la Tabla 4.75, se muestran los resultados de potencia y costos energéticos.

**Tabla 4.75: Costos energéticos para modo de regulación por VDF/bucle cerrado de presión diferencial lineal del segundo escenario**

Parámetros	Turno I-43.6Hz	Turno II-50Hz	Turno III-41.8Hz
Caudal (l/s)	23.05	32.33	20.23
Altura dinámica total (m)	32.42	36.42	31.21
Eficiencia de la bomba (%)	81.83	80.82	80.4
Eficiencia del motor (%)	92.1	92.1	92.1
Eficiencia del variador (%)	98	98	98
Potencia de la red(kW)	9.92	15.82	8.53
S / kW - hr	0.28	0.28	0.28
Horas de bombeo anual	643.25	643.28	643.4
Costo energético (S/. año)	1754.86	2799.2	1509.28
Costos energéticos totales (S/. año)		6063.35	

**Presión diferencial cuadrática** Con la Tabla 4.38 se registró el máximo de Q que pertenece al turno I con un valor de 32.33 l/s, y un ADT de 36.42 m y con la Tabla 4.37 se registró el segundo punto del turno III con valores de 20.23 l/s y un ADT de 31.21 m y el tercer punto se tabuló con los valores de 0 l/s y 30 m.

En la Tabla 4.76 se muestra las ecuaciones de tres puntos para hallar la ecuación polinómica.

**Tabla 4.76: Ecuaciones para los puntos de la presión diferencial cuadrática del segundo escenario**

Nº	$a(x)^2 + b(x) + c = y$
1	$a(32,33)^2 + b(32,33) + c = 36,42$
2	$a(20,23)^2 + b(20,23) + c = 31,21$
3	$a(0)^2 + b(0) + c = 30$

Los valores de “a, b y c” son: 0.0115, -0.1722 y 30 respectivamente, con estos datos la ecuación de la función polinómica de segundo grado para presión diferencial cuadrática:

$$y = 0,0115X^2 + 0,1722X + 30 \longrightarrow ADT = 0,0115Q^2 + 0,1722Q + 30$$

Donde “y” representa el valor de ADT y “x” que representa el Q, reemplazando diferentes Q se obtuvo los puntos de la recta para presión diferencial cuadrática que se muestran en la Tabla 4.77.

**Tabla 4.77: Puntos en la recta para presión diferencial cuadrática del segundo escenario**

Q (l/s)	ADT (m)
0	30
10	29.43
20	31.16
30	35.18
32.33	36.45

Reemplazando los caudales iniciales de los tres turnos de riego en la ecuación anterior se obtuvo el ADT para la recta de presión diferencial cuadrática que se muestran en la Tabla 4.78, además de sus respectivas velocidades.

**Tabla 4.78: Puntos de operación de la recta de presión diferencial cuadrática del segundo escenario**

Turno	Q (l/s)	ADT (m)	Velocidad (Hz)
I	23.05	32.2	43.5
II	32.11	36.42	50
III	20.23	31.21	41.8

En la Tabla 4.79 se muestra las ecuaciones del sistema para hallar el valor de K y los datos de Q y H para la gráfica de curva del sistema.

**Tabla 4.79: Valores de Q y H para la curva del sistema para presión diferencial cuadrática del segundo escenario**

Turno	K	Q (l/s)	H (m)
1	0.061	0	0
		5	1.5
		10	6.1
		15	13.6
		20	24.2
		25	37.9
		26.5	42.6
2	0.035	0	0
		5	0.9
		10	3.5
		15	7.8
		20	13.9
		25	21.8
		30	31.4
3	0.076	0	0
		5	1.9
		10	7.6
		15	17.2
		20	30.5
		24.2	44.7

En la Figura 4.38 se muestra los requerimientos iniciales o puntos de operación que se proyectaron en la recta de presión diferencial cuadrática, donde el punto de operación del III turno no se ve porque tiene el mismo valor que el punto de operación en presión diferencial cuadrática.

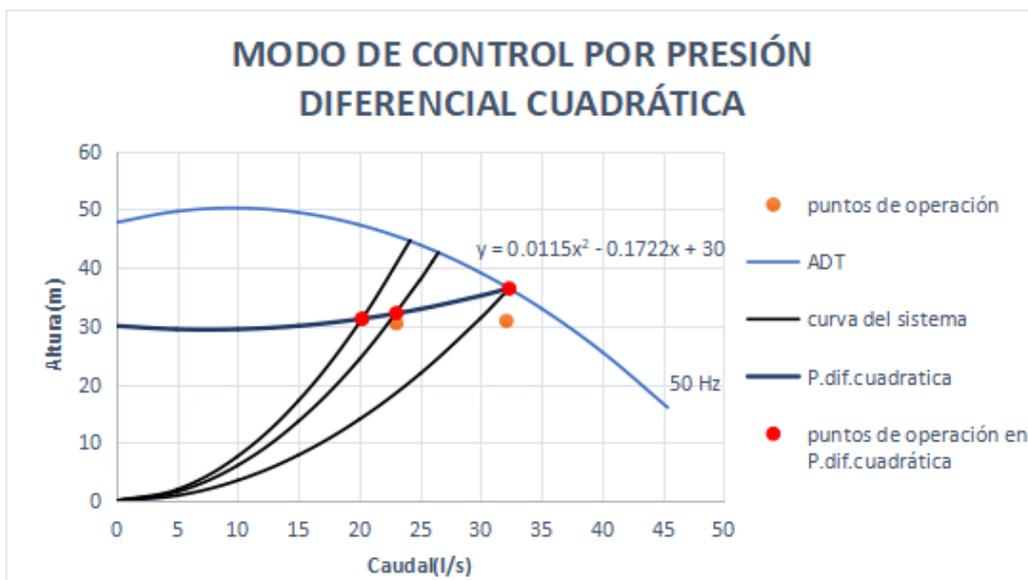


Figura 4.38: Gráfica para presión diferencial cuadrática con las curvas de sistema del segundo escenario

En la Tabla 4.80, se muestran los resultados de potencia y costos energéticos.

Tabla 4.80: Valores de Q, ADT, P y  $\eta$  para las velocidades de 43.5 y 41.8 Hz del segundo escenario

N (Hz)	Q (l/s)	ADT (m)	P (kW)	$\eta$ (%)
N2=43.5	0	36.13	4.9	0
	4.35	37.58	5.77	27.79
	8.7	38.01	6.65	48.78
	13.05	37.43	7.49	63.97
	17.4	35.83	8.24	74.21
	21.75	33.22	8.85	80.05
	26.1	29.6	9.27	81.66
	30.45	24.96	9.46	78.75
	34.8	19.31	9.36	70.35
	39.47	12.11	8.88	52.74
N3=41.8	0	38.33	5.35	0
	4.48	39.86	6.3	27.79
	8.96	40.32	7.26	48.78
	13.44	39.7	8.18	63.97
	17.92	38.01	9	74.21
	22.4	35.24	9.67	80.05
	26.88	31.39	10.13	81.66
	31.36	26.47	10.34	78.75
	35.84	20.48	10.23	70.35
	40.65	12.84	9.7	52.74

Con los valores de la Tabla anterior se halló la familia de curvas y ecuaciones para las cuatro velocidades que se muestran en la Figura 4.39, donde los valores de “ADT” y “ $\eta$ ” no cambiaron en la familia de curvas de ADT y eficiencia y “P” si varió considerablemente en la

familia de curvas de potencia para la curva de 50 Hz.

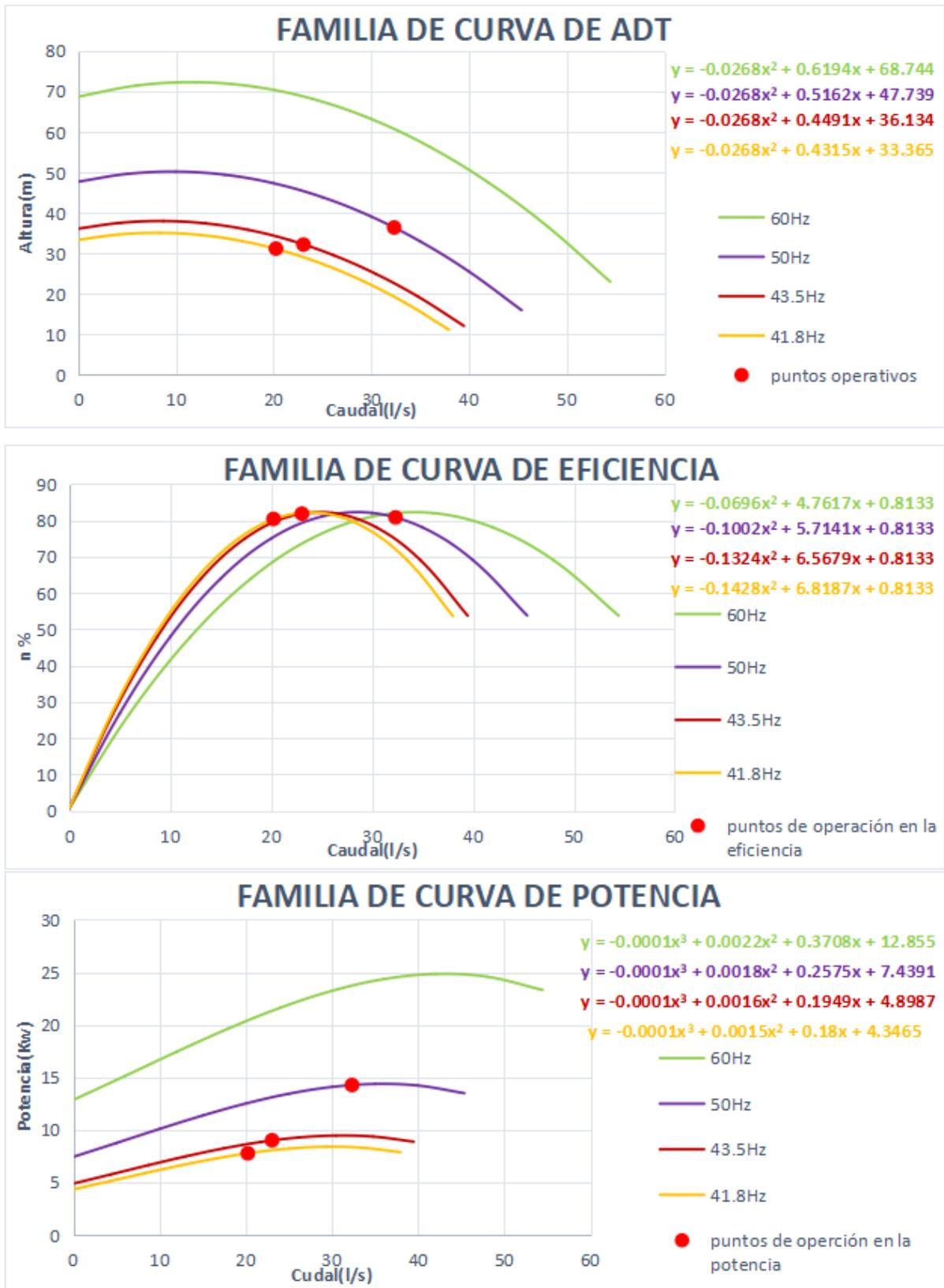


Figura 4.39: Familia de curvas de eficiencia para las velocidades 60, 50, 43.5 y 41.8 Hz del segundo escenario

En la Tabla 4.81, se muestran los resultados de potencia y costos energéticos.

**Tabla 4.81: Costos energéticos para modo de regulación por VDF/bucle cerrado de presión diferencial cuadrática del segundo escenario**

Parámetros	Turno I-43.6Hz	Turno II-50Hz	Turno III-41.8Hz
Caudal (l/s)	23.05	32.33	20.23
Altura dinámica total (m)	32.2	36.42	31.21
Eficiencia de la bomba (%)	81.86	80.82	80.31
Eficiencia del motor (%)	92.1	92.1	92.1
Eficiencia del variador (%)	98	98	98
Potencia de la red(kW)	9.85	15.82	8.54
S /. kW - hr	0.28	0.28	0.28
Horas de bombeo anual	643.25	643.28	643.4
Costo energético (S/. año)	1742.27	2799.2	1510.87
Costos energéticos totales (S/. año)		6052.33	

En este escenario, se encontró que los mayores costos de energía para el modo de control de presión constante, presión diferencial lineal y presión diferencial cuadrática fueron del Turno II-50 Hz con un valor de 2799.20 soles al año, posiblemente porque tuvo el mayor valor de potencia en la familia de curvas de potencia dado que el ADT y Q de este turno fueron los más alto de los tres turnos.

### **Tercer escenario (Caudal variable/altura dinámica total variable)**

**Presión constante** Con la Tabla 4.82 se registró el valor máximo de Q que pertenece al turno III con un valor de 28.72 l/s y un ADT de 57.07 m, este último valor representa la presión constante para cualquier caudal, los puntos de la recta se muestran en la Tabla 4.122.

**Tabla 4.82: Puntos de la recta para presión constante del tercer escenario**

Q (l/s)	ADT (m)
0	57.07
10	57.07
20	57.07
30	57.07
35	57.07

Con la línea de tendencia que nos proporcionó Excel se sacó la ecuación de la función lineal para la presión constante:

$$y = 57,07 \longrightarrow ADT = 57,07$$

Donde “y” representa el valor de ADT y al no tener un valor de “x” que represente el Q tenemos el ADT constante para los caudales iniciales de los tres turnos de riego, con los Q y ADT tenemos los puntos de operación en la recta de presión constante que se muestran en la Tabla 4.83, además de sus respectivas velocidades.

**Tabla 4.83: Puntos de operación en la recta de presión constante del tercer escenario**

Turno	Q (l/s)	ADT (m)	Velocidad (Hz)
I	23.97	57.07	48.5
II	22.91	57.07	48.3
III	28.72	57.07	50

En la Tabla 4.84 se muestra las ecuaciones del sistema para hallar el valor de K y los datos de Q y H para la gráfica de curva del sistema.

**Tabla 4.84: Valores de Q y H para la curva del sistema para presión constante del tercer escenario**

Turno	K	Q (l/s)	H (m)
1	0.099	0	0
		5	2.5
		10	9.9
		15	22.3
		20	39.7
		24.6	60.1
2	0.109	0	0
		5	2.7
		10	10.9
		15	24.5
		20	43.5
		23.7	61.1
3	0.069	0	0
		5	1.7
		10	6.9
		15	15.5
		20	27.6
		25	43.1
		28.75	57

En la Figura 4.40 se muestra los requerimientos iniciales o puntos de operación que se proyectaron en la recta de presión constante.

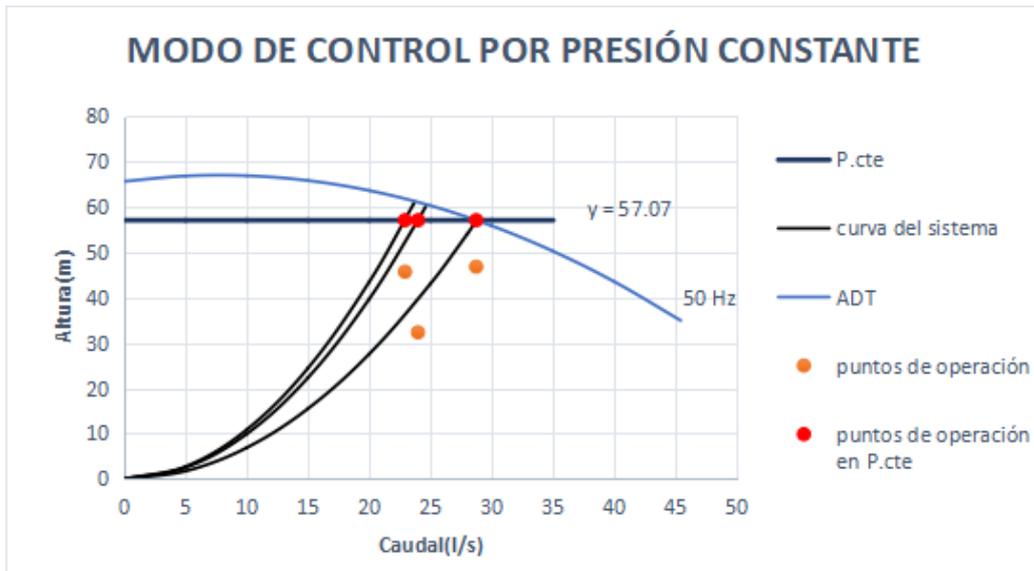


Figura 4.40: Gráfica para el modo de control de presión constante del tercer escenario

En la Tabla 4.85 se muestra los valores de Q, ADT, P y  $\eta$  para las velocidades de 48.5 y 48.3 Hz.

Tabla 4.85: Valores de Q, ADT, P y  $\eta$  para las velocidades de 48.5 y 48.3 Hz del tercer escenario

N (Hz)	Q (l/s)	ADT (m)	P (kW)	$\eta$ (%)
N2=48.5	0	61.78	9.75	0
	4.85	62.89	11.09	26.98
	9.7	62.95	12.69	47.19
	14.55	61.93	14.42	61.27
	19.4	59.86	16.15	70.51
	24.25	56.72	17.73	76.05
	29.1	52.52	19.04	78.69
	33.95	47.26	19.94	78.91
	38.8	40.93	20.28	76.8
	44.08	32.84	19.86	71.46
N3=48.3	0	61.27	9.63	0
	4.83	62.37	10.95	26.98
	9.66	62.43	12.53	47.19
	14.49	61.42	14.24	61.27
	19.32	59.37	15.95	70.51
	24.15	56.26	17.52	76.05
	28.98	52.09	18.81	78.69
	33.81	46.87	19.69	78.91
	38.64	40.6	20.03	76.8
	43.9	32.57	19.61	71.46

Con los valores de la Tabla anterior se halló la familia de curvas y ecuaciones para las cuatro velocidades que se muestran en la Figura 4.41, donde los valores de “ADT” no cambiaron

en la familia de curvas de ADT y “ $\eta$ ” y “P” si variaron en la familia de curvas de eficiencia y potencia.

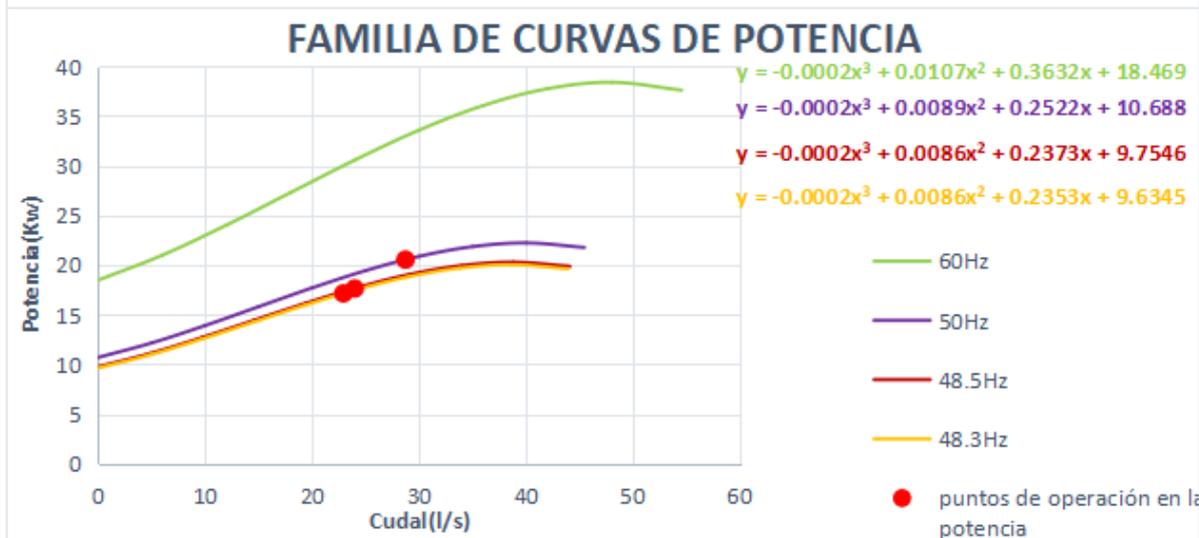
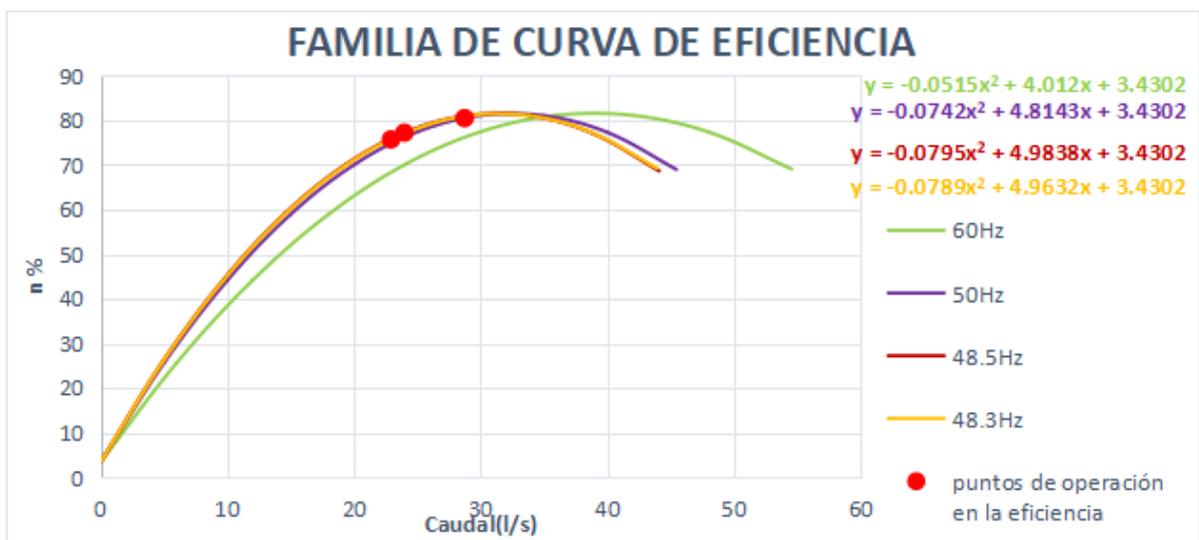
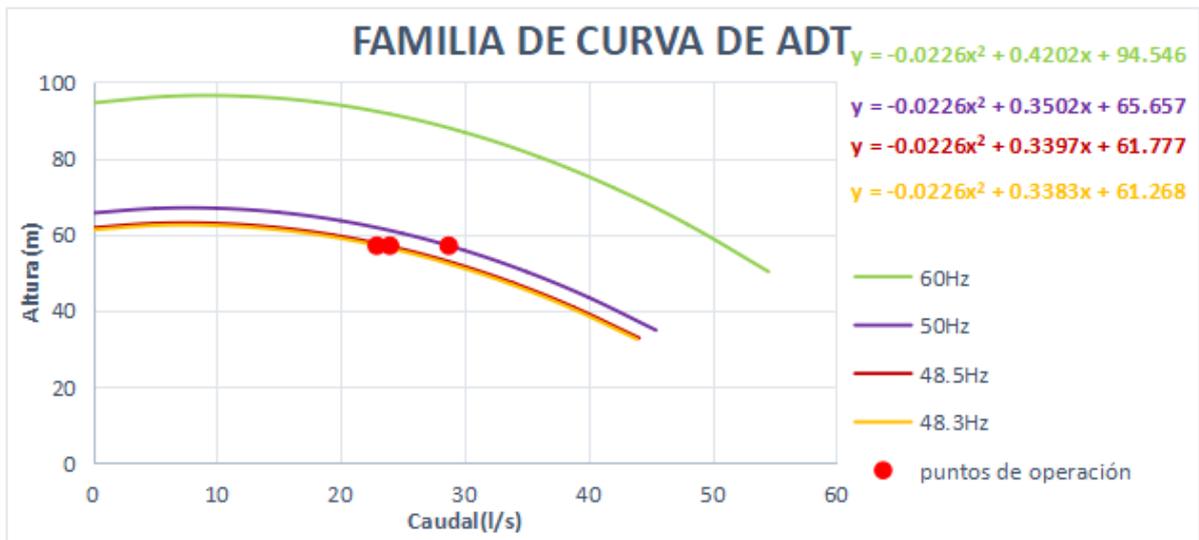


Figura 4.41: Familia de curvas ADT, potencia, eficiencia para las velocidades de 60, 50, 48.5 y 48.3 Hz del tercer escenario

En la Tabla 4.86, se muestran los resultados de potencia y costos energéticos.

**Tabla 4.86: Costos energéticos para modo de regulación por VDF/bucle cerrado de presión constante del tercer escenario**

Parámetros	Turno I-48.5Hz	Turno II-48.3Hz	Turno III-50Hz
Caudal (l/s)	23.97	22.91	28.72
Altura dinámica total (m)	57.07	57.07	57.07
Eficiencia de la bomba (%)	77.21	75.73	80.49
Eficiencia del motor (%)	93.2	93.2	93.2
Eficiencia del variador (%)	98	98	98
Potencia de la red(kW)	19.02	18.53	21.86
S / kW - hr	0.28	0.28	0.28
Horas de bombeo anual	643.35	643.48	643.35
Costo energético (S/. año)	3364.69	3279.77	3867.19
Costos energéticos totales (S/. año)		10511.65	

**Presión diferencial lineal** Con la Tabla 4.42 se registró el máximo valor de Q que pertenece al turno III con valores de 28.76 l/s y un ADT de 57.07 m y el segundo valor es la mitad la presión del primer punto que es 28.54 m y un 0 l/s. Con estos dos puntos se graficó la recta de presión diferencial lineal, en la Tabla 4.87 se muestra los puntos de la recta para la presión diferencial lineal.

**Tabla 4.87: Puntos de la recta para presión diferencial lineal del tercer escenario**

Q (l/s)	ADT (m)
0	28.54
28.76	57.07

Con la línea de tendencia que nos proporcionó Excel se sacó la ecuación de la función polinómica de primer grado para la presión diferencial lineal:

$$y = 0,9922X + 28,535 \longrightarrow ADT = 0,9922Q + 28,535$$

Donde “y” representa el valor de ADT y “x” que representa el Q, remplazando los caudales iniciales de los tres turnos de riego se obtuvo el ADT para la recta de presión diferencial lineal que se muestran en la Tabla 4.88, además de sus respectivas velocidades.

**Tabla 4.88: Puntos de operación en la recta de presión diferencial lineal del tercer escenario**

Turno	Q (l/s)	ADT (m)	Velocidad (Hz)
I	23.97	52.29	46.8
II	22.91	51.24	46.2
III	28.91	57.07	50

En la Tabla 4.89 se muestra las ecuaciones del sistema para hallar el valor de K y los datos de Q y H para la gráfica de curva del sistema.

**Tabla 4.89: Valores de Q y H para la curva del sistema para presión diferencial lineal del tercer escenario**

Turno	K	Q (l/s)	H (m)
1	0.091	0	0
		5	2.3
		10	9.1
		15	20.5
		20	36.4
		25	56.9
		25.6	59.6
2	0.098	0	0
		5	2.4
		10	9.8
		15	22
		20	39.2
		24.8	60.2
3	0.069	0	0
		5	1.7
		10	6.9
		15	15.5
		20	27.6
		25	43.1
		28.75	57

En la Figura 4.42 se muestra los requerimientos iniciales o puntos de operación que se proyectaron en la recta de presión diferencial lineal.

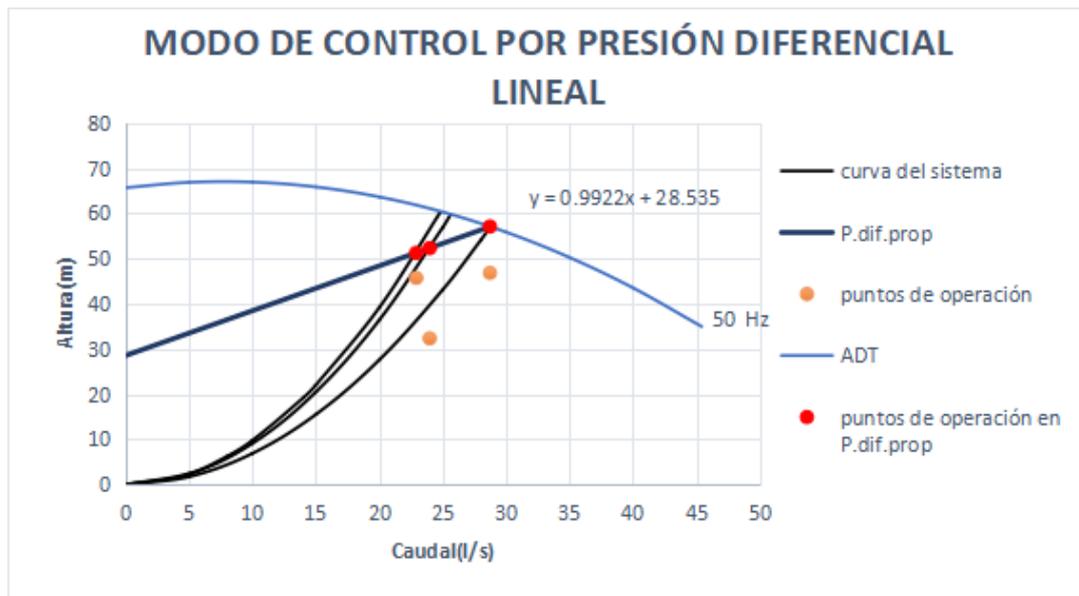


Figura 4.42: Gráfica para presión diferencial lineal del tercer escenario

En la Tabla 4.90 se muestra los valores de Q, ADT, P y  $\eta$  para las velocidades de 46.8 y 46.2 Hz.

Tabla 4.90: Valores de Q, ADT, P y  $\eta$  para las velocidades de 43.6 y 41.8 Hz del tercer escenario

N (Hz)	Q (l/s)	ADT (m)	P (kW)	$\eta$ (%)
N2=46.8	0	57.52	8.76	0
	4.68	58.56	9.96	26.98
	9.36	58.61	11.4	47.19
	14.04	57.67	12.96	61.27
	18.72	55.74	14.51	70.51
	23.4	52.82	15.93	76.05
	28.08	48.91	17.11	78.69
	32.76	44.01	17.91	78.91
	37.44	38.11	18.22	76.8
	42.53	30.58	17.84	71.46
N3=46.2	0	56.06	8.43	0
	4.62	57.07	9.58	26.98
	9.24	57.12	10.97	47.19
	13.86	56.2	12.46	61.27
	18.48	54.32	13.96	70.51
	23.1	51.47	15.33	76.05
	27.72	47.66	16.46	78.69
	32.34	42.88	17.23	78.91
	36.96	37.14	17.53	76.8
	41.99	29.8	17.17	71.46

Con los valores de la Tabla anterior se halló la familia de curvas y ecuaciones para las cuatro velocidades que se muestran en la Figura 4.43, donde los valores de “ADT” y “ $\eta$ ” no variaron

mucho en la familia de curvas de ADT y eficiencia y “P” sí varió considerablemente en la familia de curvas de potencia.

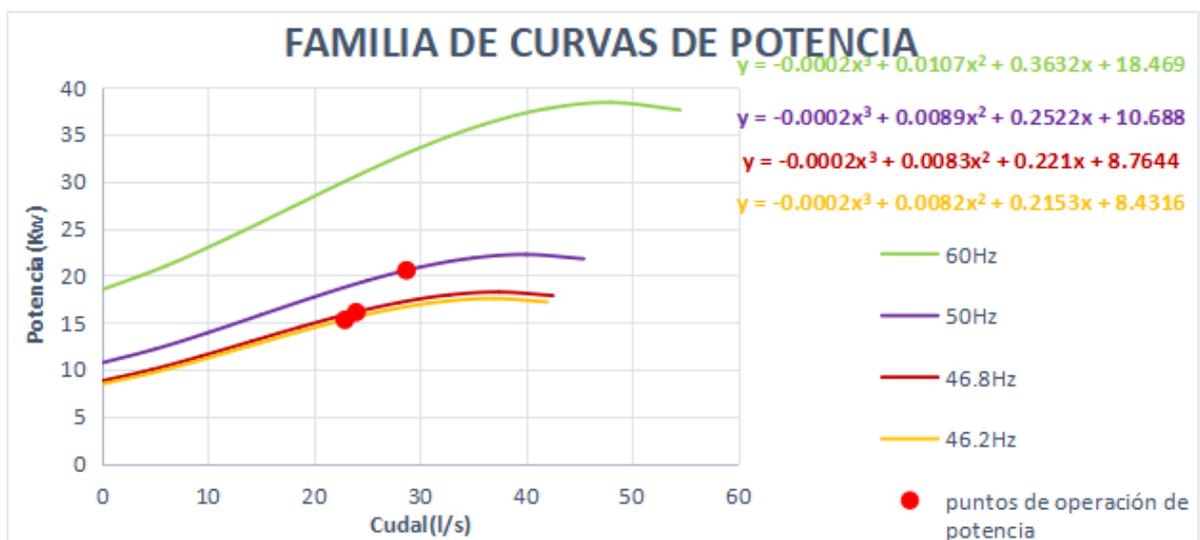
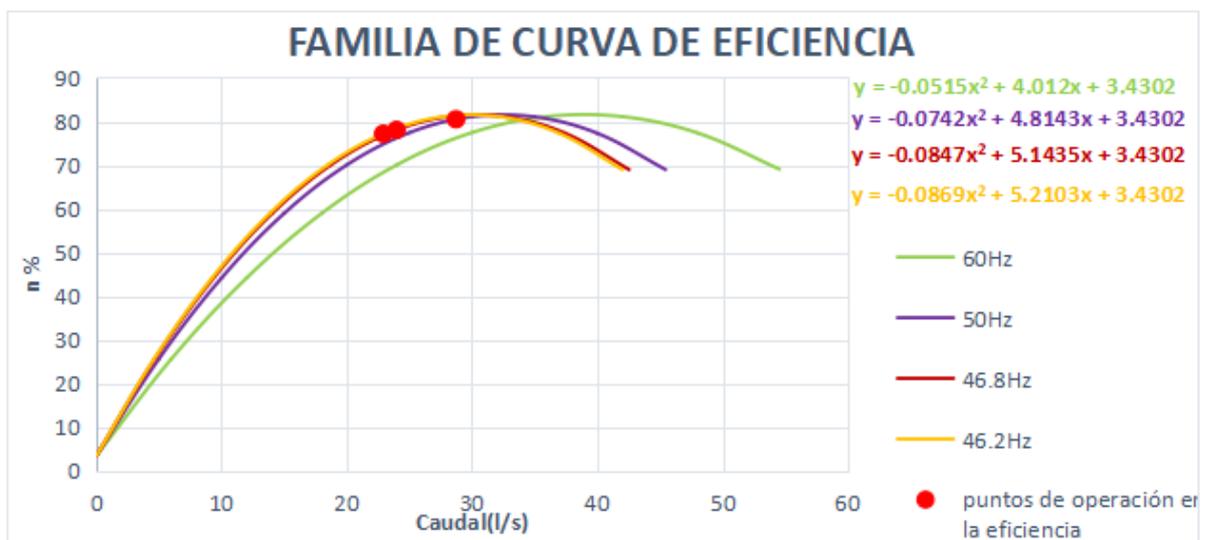
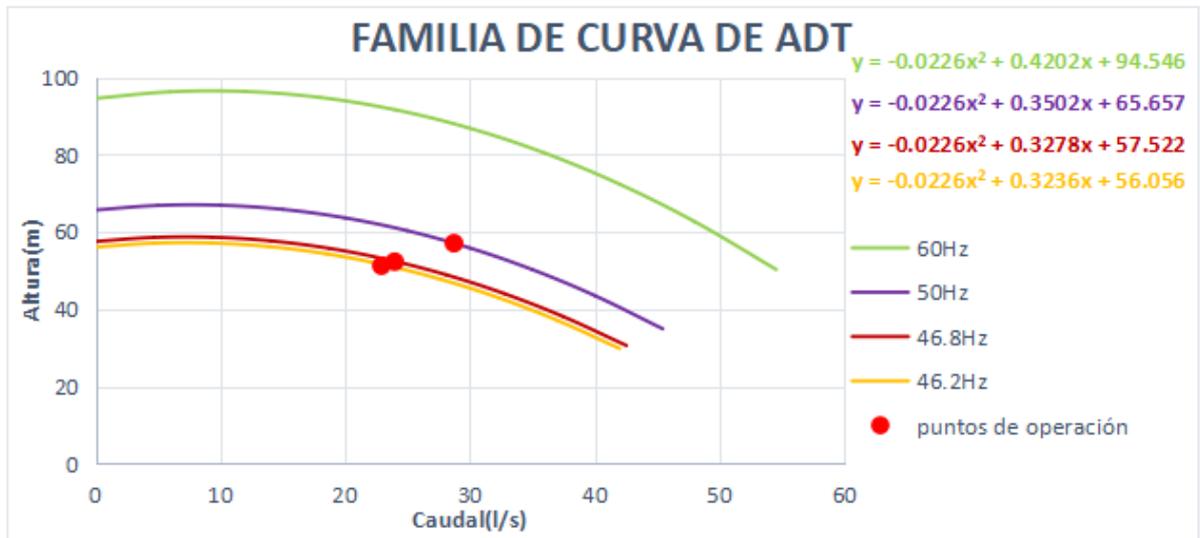


Figura 4.43: Família de curvas de ADT, eficiência y potencia para las velocidades de 60, 50, 46.8 y 46.2 Hz del tercer escenario

En la Tabla 4.91, se muestran los resultados de potencia y costos energéticos.

**Tabla 4.91: Costos energéticos para modo de regulación por VDF/bucle cerrado de presión diferencial lineal del tercer escenario**

Parámetros	Turno I-46.8Hz	Turno II-46.2Hz	Turno III-50Hz
Caudal (l/s)	23.97	22.91	28.72
Altura dinámica total (m)	52.29	51.24	57.07
Eficiencia de la bomba (%)	78.05	77.19	80.49
Eficiencia del motor (%)	93.2	93.2	93.2
Eficiencia del variador (%)	98	98	98
Potencia de la red(kW)	17.24	16.32	21.86
S /. kW - hr	0.28	0.28	0.28
Horas de bombeo anual	643.35	643.48	643.35
Costo energético (S/. año)	3049.56	2888.77	3867.19
Costos energéticos totales (S/. año)		9805.52	

**Presión diferencial cuadrática** Con la Tabla 4.42 se registró el valor máximo de Q que pertenece al turno III con un valor de 28.76 l/s y un ADT de 57.04 m y con la Tabla 4.41 se registró el segundo punto del turno II con valores de 22.91 l/s y 45.71 m y el tercer punto se tabuló y fue 0 l/s y 20 m.

En la Tabla 4.92 se muestra las ecuaciones para los tres puntos.

**Tabla 4.92: Ecuaciones para los puntos de la presión diferencial cuadrática del tercer escenario**

Nº	$a(x)^2 + b(x) + c = y$
1	$a (28,72)^2 + b(28,72) + c = 57,07$
2	$a (22,91)^2 + b(22,91) + c = 45,71$
3	$a (0)^2 + b(0) + c = 20$

Los valores de “a, b y c” son: 0.029, 0.446 y 19.98 respectivamente, con estos datos la ecuación de la función polinómica de segundo grado para presión diferencial cuadrática:

$$y = 0,029X^2 + 0,458X + 20 \longrightarrow ADT = 0,029Q^2 + 0,458Q + 20$$

Donde “y” representa el valor de ADT y “x” que representa el Q, reemplazando diferentes Q se obtuvo los puntos de la recta para presión diferencial cuadrática que se muestran en la Tabla 4.93.

**Tabla 4.93: Puntos de la recta para presión diferencial cuadrática del tercer escenario**

Q (l/s)	H (m)
0	20
10	27.48
20	40.76
26	51.51
28.72	57.07

Remplazando los caudales iniciales de los tres turnos de riego en la ecuación anterior se obtuvo el ADT para la recta de presión diferencial cuadrática que se muestran en la Tabla 4.94, además de sus respectivas velocidades.

**Tabla 4.94: Puntos de operación para la recta de presión diferencial cuadrática del tercer escenario**

Turno	Q (l/s)	ADT (m)	Velocidad (Hz)
I	23.97	47.51	44.7
II	22.91	45.71	44
III	28.72	57.07	50

En la Tabla 4.95 se muestra las ecuaciones del sistema para hallar el valor de K y lo datos de Q y H para la gráfica de curva del sistema.

**Tabla 4.95: Valores de Q y H para la curva del sistema para presión diferencial cuadrática del tercer escenario**

Turno	K	Q (l/s)	H (m)
1	0.0823	0	0
		5	2.1
		10	8.3
		15	18.6
		20	33.1
		25	51.7
		25.6	58.9
		2	0.0827
5	2.1		
10	8.3		
15	18.6		
20	33.1		
25	51.7		
26.6	58.5		
3	0.069		
		5	1.7
		10	6.9
		15	15.5
		20	27.6
		25	43.1
		28.75	57

En la Figura 4.44 se muestra los requerimientos iniciales o puntos de operación que se proyectaron en la recta de presión diferencial cuadrática, donde el punto de operación del II turno no se ve porque tiene el mismo valor que el punto de operación en presión diferencial cuadrática.

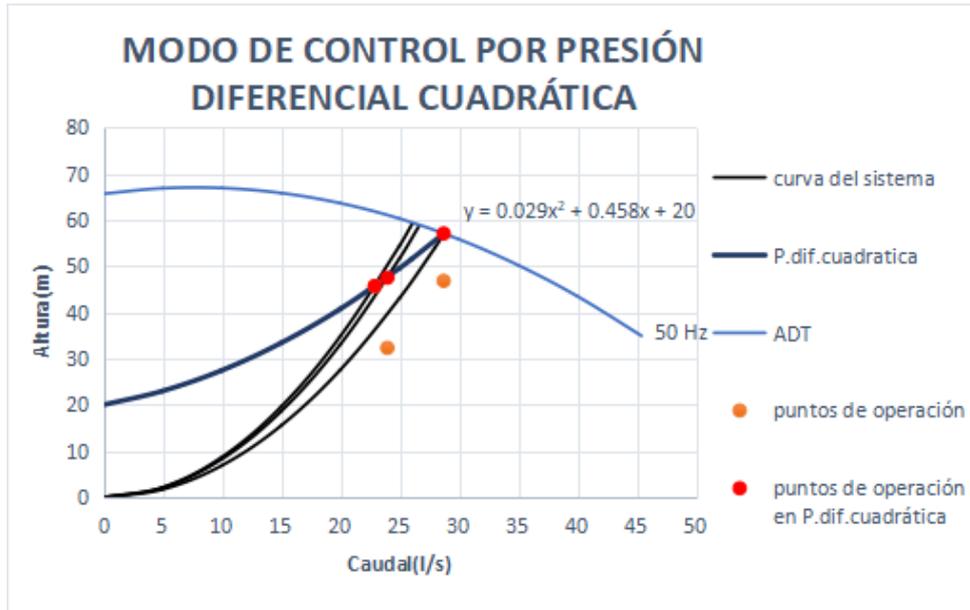


Figura 4.44: Gráfica para presión diferencial cuadrática con las curvas del sistema del tercer escenario

En la Tabla 4.96 se muestra los valores de Q, ADT, P y  $\eta$  para las velocidades de 44.7 y 44 Hz.

Tabla 4.96: Valores de Q, ADT, P y  $\eta$  para las velocidades de 44.7 y 44 Hz del tercer escenario

N (Hz)	Q (l/s)	ADT (m)	P (kW)	$\eta$ (%)
N2=44.7	0	52.48	7.64	0
	4.47	53.42	8.68	26.98
	8.94	53.47	9.93	47.19
	13.41	52.61	11.29	61.27
	17.88	50.85	12.64	70.51
	22.35	48.18	13.88	76.05
	26.82	44.62	14.91	78.69
	31.29	40.14	15.61	78.91
	35.76	34.77	15.87	76.8
	40.62	27.9	15.55	71.46
N3=44	0	50.84	7.28	0
	4.4	51.76	8.28	26.98
	8.8	51.81	9.47	47.19
	13.2	50.97	10.77	61.27
	17.6	49.27	12.06	70.51
	22	46.69	13.24	76.05
	26.4	43.23	14.22	78.69
	30.8	38.9	14.89	78.91
	35.2	33.69	15.14	76.8
	39.99	27.03	14.83	71.46

Con los valores de la Tabla anterior se halló la familia de curvas y ecuaciones para las cuatro velocidades que se muestran en la Figura 4.45, donde los valores de “ADT” y “ $\eta$ ” no cam-

biaron en la familia de curvas de ADT y eficiencia y “P” si varió considerablemente en la familia de curvas de potencia para la curva de 50 Hz.

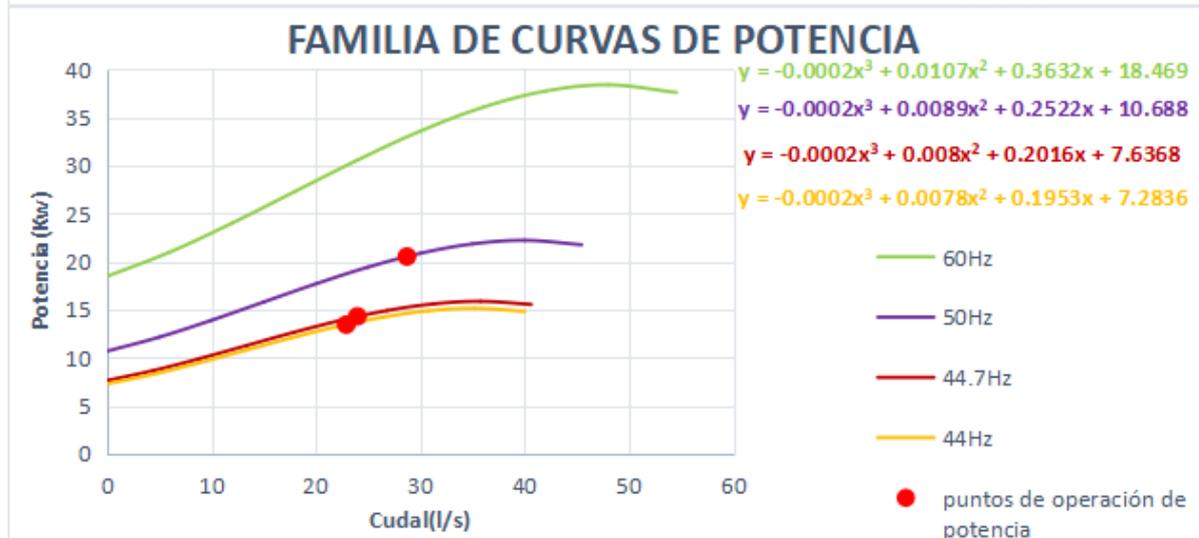
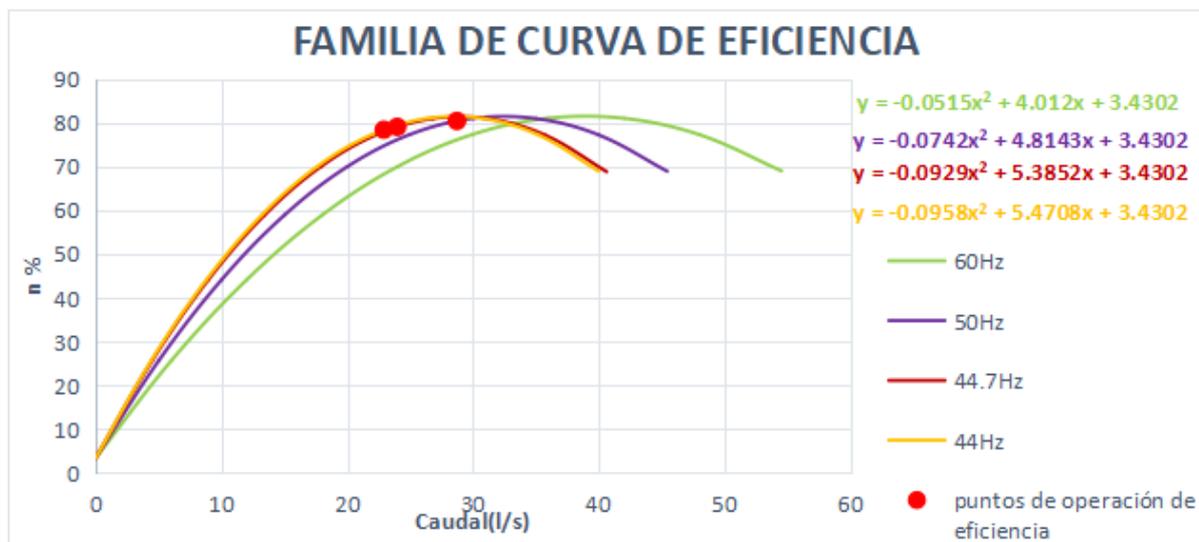
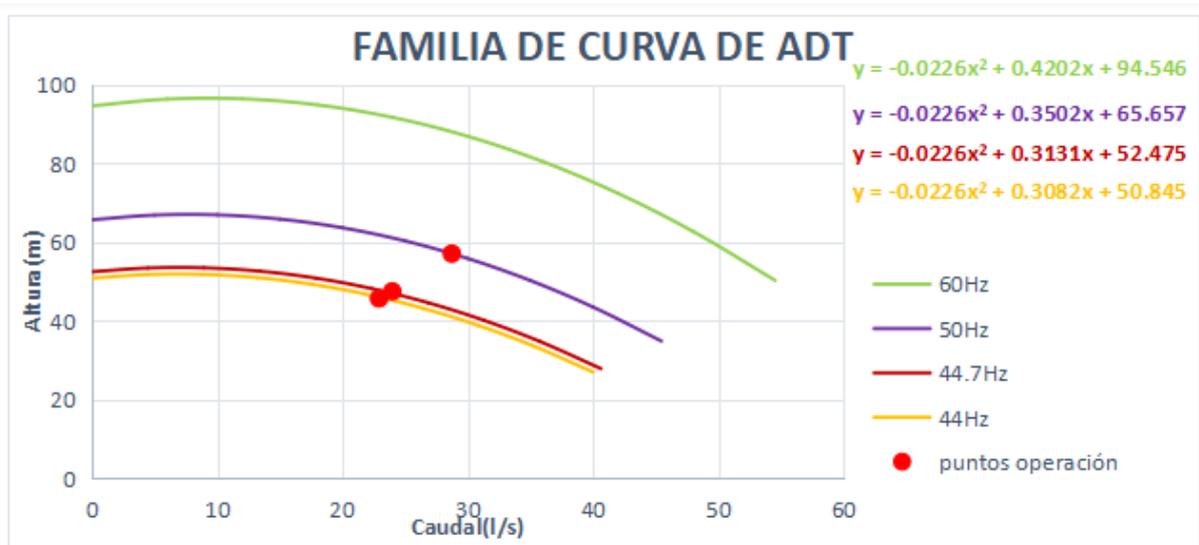


Figura 4.45: Família de curvas de ADT, eficiencia y potencia para las velocidades de 60,50, 44.7 y 44 Hz del tercer escenario

En la Tabla 4.97, se muestran los resultados de potencia y costos energéticos.

**Tabla 4.97: Costos energéticos para modo de regulación por VDF/bucle cerrado de presión diferencial cuadrática del tercer escenario**

Parámetros	Turno I-44.7Hz	Turno II-44Hz	Turno III-50Hz
Caudal (l/s)	23.97	22.91	28.72
Altura dinámica total (m)	47.51	45.71	57.07
Eficiencia de la bomba (%)	79.14	78.48	80.49
Eficiencia del motor (%)	93.2	93.2	93.2
Eficiencia del variador (%)	98	98	98
Potencia de la red(kW)	15.45	14.32	21.86
S /. kW - hr	0.28	0.28	0.28
Horas de bombeo anual	643.35	643.48	643.35
Costo energético (S/. año)	2732.57	2534.43	3867.19
Costos energéticos totales (S/. año)	9134.2		

En este escenario, se encontró que los mayores costos de energía para el modo de control de presión constante, presión diferencial lineal y presión diferencial cuadrática fueron del Turno III-50 Hz con un valor de 3867.19 soles al año, posiblemente porque tuvo el mayor valor de potencia en la familia de curvas de potencia dado que el ADT y Q de este turno fueron los más alto de los tres turnos.

Los mayores costos energéticos para bucle abierto y cerrado son para las mayores velocidades de giro todo lo contrario ocurre con menores velocidades que nos proporcionan menores costos energéticos.

En la Tabla 4.98 y 4.99, se muestra las eficiencias energéticas del segundo y tercer escenario.

**Tabla 4.98: Eficiencia energética del segundo escenario con VDF/bucle cerrado**

Turno	Presión constante			Presión diferencial lineal			Presión diferencial cuadrática		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
$\eta_{bomba}$ (%)	81.16	80.82	78.71	81.83	80.82	80.4	81.86	80.82	80.31
$\eta_{motor}$ (%)	92.1	92.1	92.1	92.1	92.1	92.1	92.1	92.1	92.1
$\eta_{VDF}$ (%)	98	98	98	98	98	98	98	98	98
$\eta_{energetica}$ (%)	73.25	72.95	71.04	73.86	72.95	72.57	73.89	72.95	72.49
Promedio (%)	72.41			73.12			73.11		

**Tabla 4.99: Eficiencia energética del tercer escenario con VDF/bucle cerrado**

Turno	Presión constante			Presión diferencial lineal			Presión diferencial cuadrática		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
$\eta_{bomba}$ (%)	77.21	75.73	80.49	78.05	77.19	80.49	79.14	78.48	80.49
$\eta_{motor}$ (%)	93.2	93.2	93.2	93.2	93.2	93.2	93.2	93.2	93.2
$\eta_{VDF}$ (%)	98	98	98	98	98	98	98	98	98
$\eta_{energetica}$ (%)	70.52	69.17	73.52	71.29	70.5	73.52	72.28	71.68	73.52
Promedio (%)		71.07			71.77			72.49	

Al ser la eficiencia del motor constante para los tres turnos de riego las cuales variaron entre 90.4 % y 93.8 % y la eficiencia del variador constante para todos los escenarios con un valor de 98 % ,el valor de la eficiencia energética dependió básicamente de la eficiencia de la bomba las cuales variaron por cada turno de riego , en comparación de la eficiencia energética sin VDF donde se tuvo el mayor valor de eficiencia energética por turno debido a la eficiencia de la bomba en este caso no fue así, pues la mayor eficiencia por turno fue del primer escenario del I turno, esta dependió de la eficiencia del motor pues era la más alta con un valor de 93.8 % y que la eficiencia de la bomba también era alta con un valor de 81.28 % pero sin ser la más alta lo que hizo que se tuviera un valor de 74.72 % de eficiencia energética por turno, y el mayor valor de eficiencia en promedio fue también del primer escenario con un valor de 73.90 %.

## 4.12. Determinación de la región de operación permitida y admitida

Según los criterios planteados en la metodología se obtuvieron los siguientes datos para cada escenario. Se detalló los cálculos para el primer escenario para un mejor entendimiento.

### Primer escenario (Caudal contantes/Presión variable)

**AOR y POR sin el uso del VDF** Para determinar la región de operación admitida y permitida, se comenzó con la gráfica de ADT de 50 Hz.

Para la región de operación admitida (AOR) se tomó el caudal mínimo de 17.41 l/s y máximo de 45.45 l/s y se reemplazaron en la ecuación de ADT de 50 Hz:

$$ADT_{50Hz} = -0,0233Q^2 + 0,3672Q + 56,649$$

Teniendo así los valores de ADT límites que se muestran en la Tabla 4.100 para la gráfica de AOR.

**Tabla 4.100: Valores límites de la AOR del primer escenario**

Q (l/s)	ADT (m)
17.41	55.98
45.45	25.21

El punto de máxima eficiencia ( $Q_{BEP}$ ) se calculó con la ecuación de la eficiencia de 50 Hz:

$$\eta_{50Hz} = -0,0813Q^2 + 5,0795Q + 1,2264$$

Y usando la ecuación de vértice se obtuvieron los datos de:

$$b = 5,0795$$

$$a = 0,0813$$

Dando como resultado el Q de máxima eficiencia con un valor de 31.24l/s, reemplazando este valor en la ecuación de ADT de 50 Hz dio como resultado 45.38 m. En la Tabla 4.101 se muestra el  $Q_{BEP}$  y los valores límites de este para la gráfica de la POR.

**Tabla 4.101: Valores límites de la POR del primer escenario**

50 Hz	Q (l/s)	ADT (m)
$Q_{BEP}$	31.24	45.38
70 %* $Q_{BEP}$	21.87	53.54
120 %* $Q_{BEP}$	37.49	37.67

**POR con el uso del VDF** Los puntos de máxima eficiencia ( $Q_{BEP}$ ) para los tres puntos operativos se calcularon con la ecuación de la eficiencia para las velocidades de 49, 45.7 y 43.6 Hz:

$$\eta_{49Hz} = -0,0852Q^2 + 5,2086Q + 2,0962$$

$$\eta_{45,75Hz} = -0,0979Q^2 + 5,5847Q + 2,0962$$

$$\eta_{43,6Hz} = -0,1076Q^2 + 5,8537Q + 2,0962$$

Usando la ecuación de vértice se obtuvieron los datos de a, b y Q de máxima eficiencia ( $Q_{mef}$ ) para las tres velocidades que se muestran en la Tabla 4.102.

**Tabla 4.102: Valores de a, b y Q de máxima eficiencia del primer escenario**

Velocidad (Hz)	a	b	$Q_{mef}$ (l/s)
49	0.0852	5.2086	30.57
45.7	0.0979	5.5847	28.52
43.6	0.1076	5.8537	27.2

Los caudales de máxima eficiencia se reemplazaron en las ecuaciones de ADT para las velocidades de 49, 45.7 y 43.6 Hz:

$$ADT_{49Hz} = -0,0233Q^2 + 0,3599Q + 54,406$$

$$ADT_{45,75Hz} = -0,0233Q^2 + 0,3356Q + 47,324$$

$$ADT_{43,6Hz} = -0,0233Q^2 + 0,3202Q + 43,075$$

En la Tabla 4.103 se muestra los puntos de máxima eficiencia y los valores límites de este para la gráfica de la POR.

**Tabla 4.103: Valores límites de la POR para las tres velocidades del primer escenario**

Caudales	49 Hz		45.7 Hz		43.6 Hz	
	Q (l/s)	ADT (m)	Q (l/s)	ADT (m)	Q (l/s)	ADT (m)
$Q_{BEP}$	30.57	43.63	28.52	37.97	27.2	34.55
$Q_{BEP} *70\%$	21.4	51.44	19.96	44.76	19.04	40.72
$Q_{BEP} *120\%$	36.68	36.25	34.22	31.55	32.64	28.7

El mismo procedimiento del primer escenario se siguió para los demás escenarios y se obtuvieron los valores límites para la AOR y POR sin el uso del VDF que se muestran en la Tabla

4.104, 4.105 y 4.106 se encuentran los valores límites para la POR con el uso del VDF.

En la Figura 4.46 y 4.47 los puntos de operación se encontraron dentro de la POR lo que garantiza mínimas pérdidas hidráulicas, menor vibración y que la bomba funcione de forma energéticamente eficiente lo que se traduce a menores consumos energéticos, solo un punto de operación se encontró un poco fuera del límite de la POR que fue del quinto escenario.

**Tabla 4.104: Valores límites de la AOR sin el uso del VDF para el segundo, tercer y cuarto escenario**

Segundo escenario		Tercer escenario		Cuarto escenario	
Q (l/s)	ADT (m)	Q (l/s)	ADT (m)	Q (l/s)	ADT (m)
17.35	48.63	17.34	64.93	17.23	48.68
45.37	15.99	45.44	34.91	45.41	15.97

**Tabla 4.105: Valores límites de la POR sin el uso del VDF para el segundo, tercer y cuarto escenario**

50 Hz	Segundo escenario		Tercer escenario		Cuarto escenario		Quinto escenario	
	Q(l/s)	ADT(m)	Q(l/s)	ADT(m)	Q(l/s)	ADT(m)	Q(l/s)	ADT(m)
$Q_{BEP}$	28.9	40.27	32.69	52.96	28.93	40.27	30.01	34.16
70 %* $Q_{BEP}$	20.23	47.21	22.88	61.84	20.25	47.22	21	39.61
120 %* $Q_{BEP}$	34.68	33.41	39.22	44.62	34.71	33.4	36.01	28.89

**Tabla 4.106: Valores límites de la POR con el uso del VDF para el segundo y tercer escenario**

Caudales	Segundo escenario						Tercer escenario					
	47.4 Hz		42.5 Hz		41.9Hz		46.2 Hz		44 Hz		38.6 Hz	
	Q	ADT	Q	ADT	Q	ADT	Q	ADT	Q	ADT	Q	ADT
	(l/s)	(m)	(l/s)	(m)	(l/s)	(m)	(l/s)	(m)	(l/s)	(m)	(l/s)	(m)
$Q_{BEP}$	27.03	36.55	24.22	29.4	23.88	28.58	29.95	45.47	28.53	41.24	25.03	31.74
$Q_{BEP}*70\%$	18.92	42.57	16.95	34.41	16.71	33.45	20.97	52.91	19.97	47.99	17.52	36.93
$Q_{BEP}*120\%$	32.44	30.58	29.06	24.8	28.65	24.11	35.94	38.49	34.24	34.91	30.04	26.86

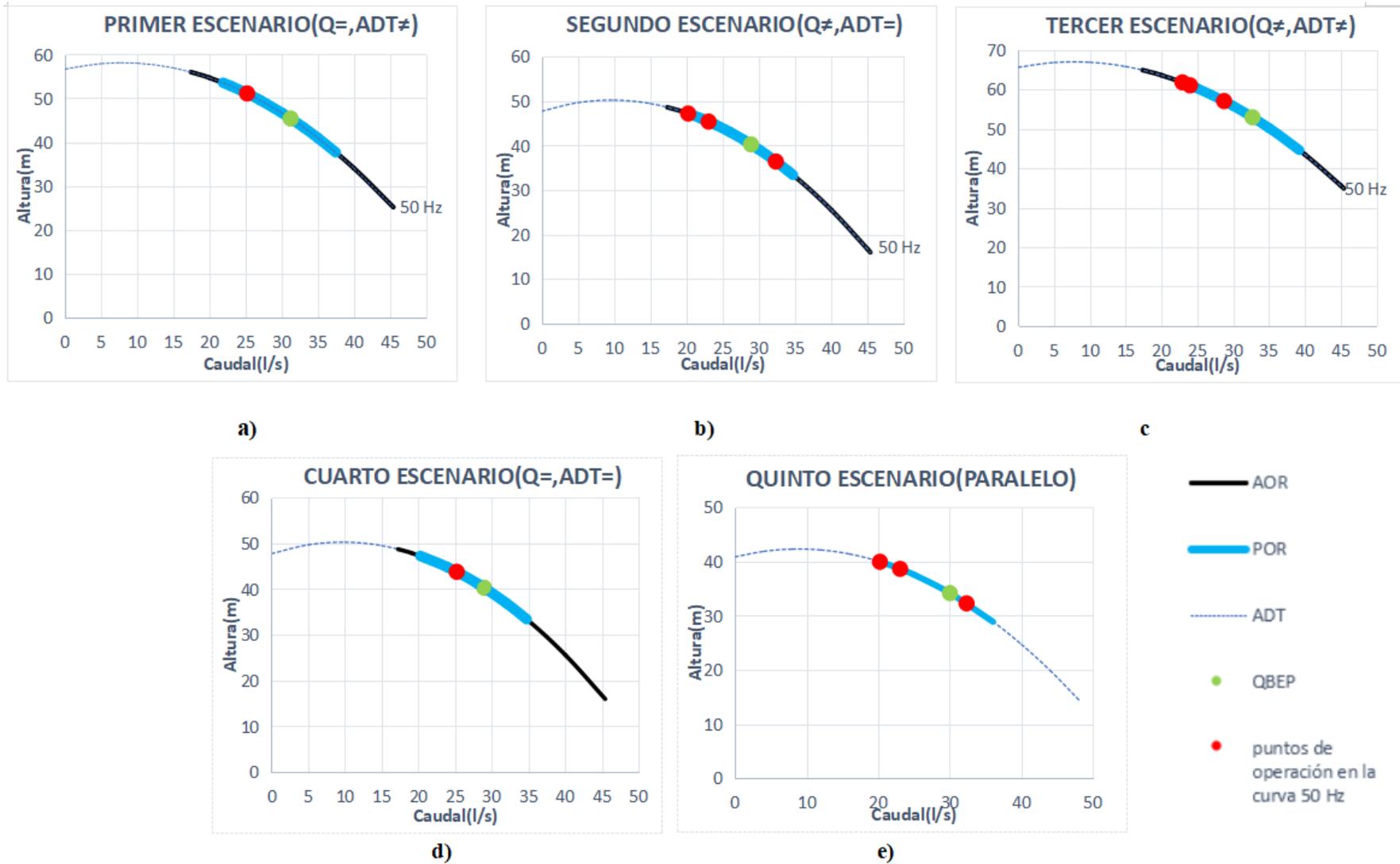


Figura 4.46: AOR y POR sin el uso del VDF para a) Primer, b) Segundo, c) Tercer, d) Cuarto, e) Quinto escenario

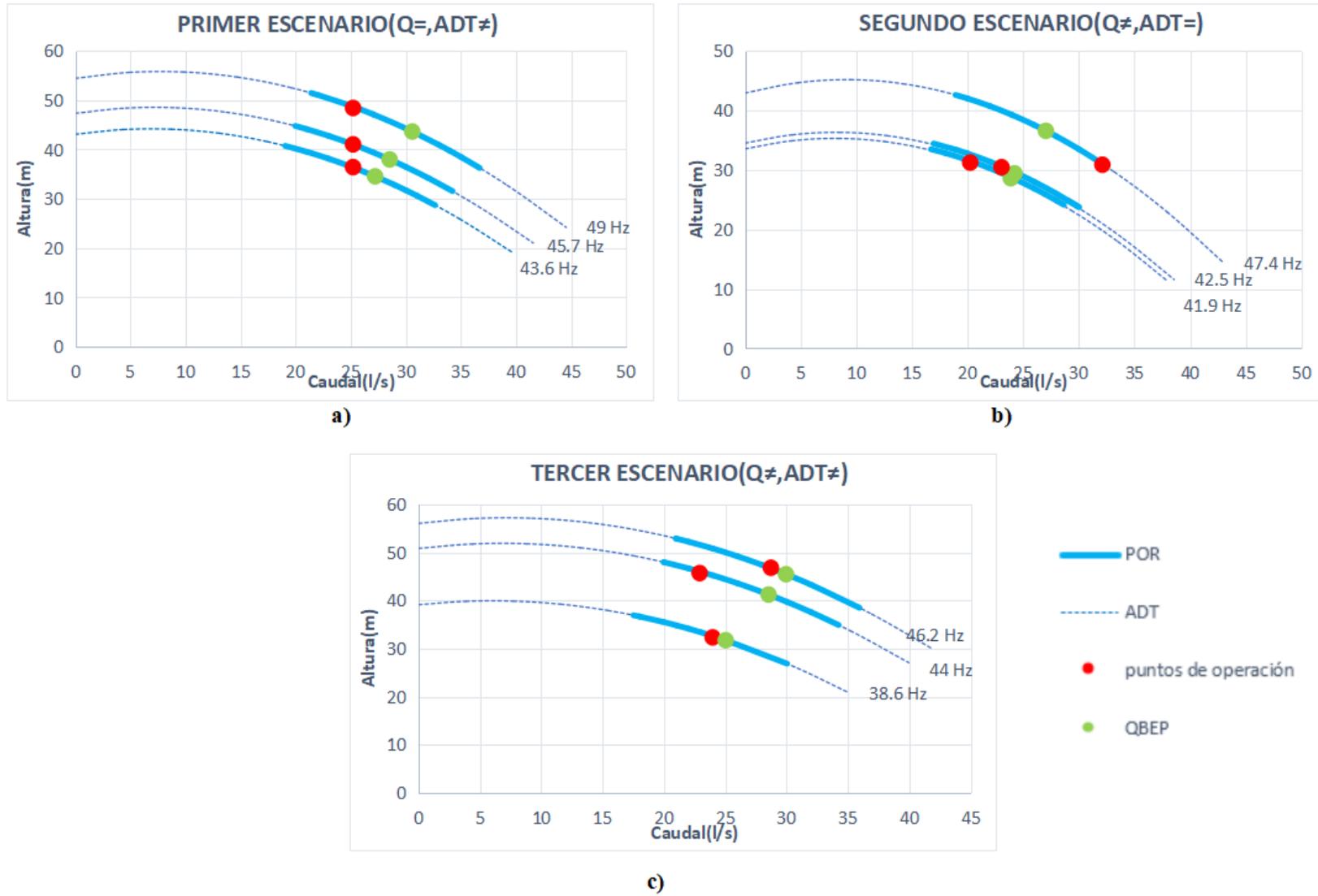


Figura 4.47: POR con el uso del VDF para el a) Primer, b) Segundo, c) Tercer escenario

Los resultados de la Figura 4.46 proporcionan soporte concluyente que mientras más cercano estén los puntos de operación al  $Q_{BEP}$  las eficiencias de las bombas serán mayores lo que se podría traducir en menores costos de energía y emisiones de  $CO_2$ . Comparando a simple vista que punto está más cerca del punto de máxima eficiencia de los cinco escenarios es del II turno del quinto escenario con un valor de 75.08 %, pero el mayor valor según la Tabla 4.53 es del III turno del tercer escenario con un valor de 83 % esto se debió a que la curva de eficiencia del tercer escenario alcanzó valores más altos de eficiencia de la bomba y en cambio la curva de eficiencia del quinto escenario sus valores fueron un poco más bajos.

La Figura 4.47 debe ser observada con cautela porque se tiene más de una velocidad y no todos los puntos de operación están cercanos al  $Q_{BEP}$  por tener diferentes requerimientos de Q y ADT, a simple vista los puntos que más se acercaron al punto de máxima eficiencia fueron del I turno del segundo escenario con un valor de 82.02 % y del I turno del tercer escenario con un valor de 81.35 % los valores no están tan alejados porque las curvas de eficiencia de la bomba son parecidas y llegan casi a los mismos valores de eficiencia de la bomba.

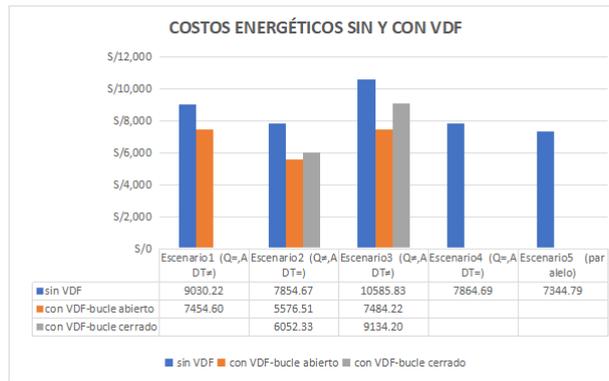
### 4.13. Comparaciones de costos energéticos sin y con el uso del VDF

En la Tabla 4.107 se comparan los costos energéticos totales sin y con el VDF para todos los escenarios.

**Tabla 4.107: Costos energéticos sin y con VDF para todos los escenarios**

Escenario	Descripción	Costos energéticos (S/. año)		
		Sin VDF	Con VDF bucle abierto	Con VDF bucle cerrado
1°	Q=, ADT≠	9030.22	7454.6	-
2°	Q≠, ADT=	7854.67	5576.51	6052.33
3°	Q≠, ADT≠	10585.83	7484.22	9134.2
4°	Q=, ADT=	7864.69	-	-
5°	Paralelo	7344.79	-	-

En la Figura 4.48 se ilustra los costos energéticos de la Tabla 4.103.



**Figura 4.48: Costos energéticos sin y con el VDF**

Sin VDF los menores costos de energía fueron del quinto escenario (bombas en paralelo), con un valor de 7344.79 soles anuales seguidos del segundo escenario (caudal variable y altura dinámica constante), con un valor de 7854.67 soles anuales y los mayores costos de energía fueron del tercer escenario (caudales y alturas dinámicas variables), con un valor de 10585.83 soles anuales seguidos del primer escenario (caudales constantes y alturas dinámicas variables), con un valor de 9030.22 soles anuales. Estos valores variaron por las potencias requeridas (que son el producto de caudal, altura dinámica total, eficiencia de la bomba y eficiencia del motor) por cada turno de cada escenario, al compararlos en base a una área igual de 17 ha y considerando el mismo cultivo para todos los escenarios, los caudales totales (suma de caudales por turno) para los cinco escenarios son iguales, las eficiencias de la bomba al estar casi todas dentro de la POR género que sus valores no variaran mucho entre sí con valores mayores a 76 %, exceptuando el quinto escenario que tuvo valores menores a 76 % y la eficiencia del motor no vario demasiado, por lo que el parámetro que determinaría que los costos fueran altos o bajos son las alturas dinámicas totales. Por este motivo que los menores costos de energía fueron del quinto escenario, pues sus alturas dinámicas totales son menores en comparación a los demás escenarios.

Con VDF por bucle abierto los menores costos de energía fueron del segundo escenario (caudales variables y alturas dinámicas totales variables), con un valor de 1858.84 soles anuales y los mayores costos fueron del tercer escenario (caudales y alturas dinámicas totales variables), con un valor de 2494.74 soles anuales. Estos valores variaron por la misma explicación sin VDF que es por la altura dinámica total, los valores del segundo escenario fueron mucho mayores pues para el segundo escenario las alturas dinámicas totales variaron entre 30.43 a 31.21 metros y las alturas dinámicas totales del tercer escenario variaron entre 32.33 a 46.82

metros lo que ocasiono mayores costos energéticos.

## 4.14. Ahorros energéticos con el uso del VDF

### 4.14.1. Bucle abierto

En la Tabla 4.108 se muestra los costos de energía sin y con el uso del VDF, la resta de estos dos nos da el ahorro de energía al usar VDF para los tres primeros escenarios, se tuvo un ahorro de energía para todos los escenarios y el mayor ahorro fue del tercer escenario por tener los costos energéticos más altos sin el uso del variador de frecuencia.

**Tabla 4.108: Ahorros en costos energéticos con VDF/bucle abierto**

Escenario	Descripción	Costos energéticos (S/. año)		Ahorros en costos energéticos	
		Sin VDF	Con VDF	(S/. año)	(% año)
1°	Q=, ADT≠	9030.22	7454.6	1575.63	17.45
2°	Q≠, ADT=	7854.67	5576.51	2278.15	29
3°	Q≠, ADT≠	10585.83	7484.22	3101.6	29.3

Los resultados del segundo y tercer escenario para ahorros en costos de energía coinciden con los ahorros esperados al usar el variador de frecuencia por AkzoNobel (2016), en los que el ahorro de energía varía entre el 30 a 50 %, sin embargo el primer escenario tuvo un ahorro de 17.45 % posiblemente porque el ADT fue mayor que de los demás escenarios, cabe resaltar que en el ejemplo de caudales constantes y presiones variables la investigación de USDA (2014) el ahorro de energía fue de 17.34 %, es decir que el ahorro depende de que escenario se emplee.

Con los ahorros energéticos para los tres escenarios, los datos de precio del variador de frecuencia que se encuentran el Anexo 9, se calculó el tiempo de recuperación de la inversión que se muestra en la Tabla 4.109, donde el menor tiempo de recuperación fue para el tercer escenario y se debió a que tienes mayores ahorros en costos energéticos que los demás escenarios.

**Tabla 4.109: Tiempo de recuperación para los tres primeros escenarios**

Escenario	Descripción	VDF		
		Modelo	Precio (S/. año)	tr (años)
1°	Q=, ADT≠	CUE 3x380-500V-18.5kW	12158.25	7.72
2°	Q≠, ADT=	CUE 3x380-500V-15kW	10905.45	4.79
3°	Q≠, ADT≠	CUE 3x380-500V-22kW	13411.05	4.32

#### 4.14.2. Bucle cerrado

Al tener 3 tipos de modos de control para bucle cerrado se especificó el ahorro energético de velocidad constante con los tres modos de control que son presión constante, presión diferencial lineal y presión diferencial cuadrática para el segundo y tercer escenario.

#### Segundo escenario (Altura dinámica total contante/caudal variable)

En la Tabla 4.110 se muestran los ahorros energéticos con el VDF para cada modo de control de bucle cerrado del segundo escenario.

**Tabla 4.110: Ahorros energéticos con VDF/bucle cerrado del segundo escenario**

Tipo de control		Costo energético (S/. año)	Ahorro vs. (VV/PC) (%)	Ahorro vs. (VV/PDL) (%)	Ahorro vs. (VV/PDC) (%)
sin	Velocidad cte./	7854.67			
VDF	Caudal variable (VC/VV)				
	Velocidad variable/	6585.24	16.16		
con	Presión.cte (VV/PC)				
VDF	Velocidad variable/	6063.35	22.81	8.61	
(bucle	Presión dif lineal (VV/PDL)				
cerrado)	Velocidad variable/	6052.33	22.95	8.81	0.18
	Presión dif cuadrática (VV/PDC)				

#### Tercer escenario (Caudal variable/altura dinámica total variable)

En la Tabla 4.111 se muestran los ahorros energéticos con el VDF para cada modo de control de bucle cerrado.

**Tabla 4.111: Ahorros energéticos con VDF/bucle cerrado del tercer escenario**

Tipo de control		Costo energético (S/. año)	Ahorro vs. (VV/PC) (%)	Ahorro vs. (VV/PDL) (%)	Ahorro vs. (VV/PDC) (%)
sin	Velocidad cte./	10585.83			
VDF	Caudal variable (VC/VV)				
	Velocidad variable/	10511.65	0.70		
con	Presión.cte (VV/PC)				
VDF	Velocidad variable/	9805.52	7.37	7.20	
(bucle	Presión dif lineal (VV/PDL)				
cerrado)	Velocidad variable/	9134.20	13.71	15.08	7.35
	Presión dif cuadrática (VV/PDC)				

En la Tabla 4.112 se muestra los costos de energía sin y con el uso del VDF, pero para el tipo de control de presión diferencial cuadrática que fue la que mayores ahorros se tuvo en cada escenario, la resta de estos dos nos da el ahorro de energía al usar VDF para el segundo y tercer escenarios, se tuvo un ahorro de energía para los dos escenarios y el mayor ahorro fue del segundo escenario por tener menores costos energéticos sin VDF.

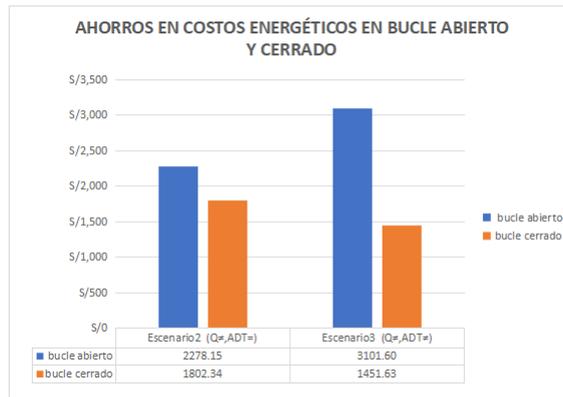
**Tabla 4.112: Ahorros energéticos con VDF/bucle cerrado**

Escenario	Descripción	Costos energéticos (S/. año)		Ahorros en costos energéticos	
		Sin VDF	Con VDF	(S/. año)	(% año)
2°	Q≠, ADT=	7854.67	6052.33	1802.34	22.95
3°	Q≠, ADT≠	10585.83	9134.2	1451.63	13.71

En la Tabla 4.113 se muestra una comparación de ahorros en costos de energía con VDF de bucle cerrado y abierto, los mayores ahorros fueron para bucle abierto de 20.89 % y 53.20 % mayor que bucle cerrado y en la Figura 4.49 una gráfica de estos ahorros.

**Tabla 4.113: Comparación de ahorros energéticos con VDF/bucle abierto y cerrado**

Escenario	Descripción	Ahorros en costos energéticos (S/. año)		Ahorro respecto a bucle cerrado (%/año)
		bucle abierto	bucle cerrado	
		2°	Q≠, ADT=	
3°	Q≠, ADT≠	3101.6	1451.63	53.2



**Figura 4.49: Ahorros en costos energéticos en bucle abierto y cerrado**

Una explicación tentativa para estos resultados es que al usar bucle cerrado aún se tiene energía desperdiciada porque la velocidad de la bomba no gira precisamente en el punto de operación o requerimiento inicial, sino que gira a una mayor velocidad por tener un mayor requerimiento de ADT.

#### **4.15. Emisiones de CO<sub>2</sub> sin VDF**

Los datos de potencia de la red y horas de operación fueron calculados en la sección 4.10 para cada escenario. En la Tabla 4.114 se muestra la energía anual sin VDF para el I, II y III turno de los cinco escenarios.

**Tabla 4.114: Energía anual sin VDF para los cinco escenarios**

Escenario	Parámetros	Unidad	Turno I	Turno II	Turno III
1°	Potencia de la red	kW	17.01	17.01	17.01
	Horas de operación anual	hr	643.39	643.39	643.39
	Energía anual	kWh	10945.73	10945.73	10945.73
2°	Potencia de la red	kW	14.53	15.9	13.97
	Horas de operación anual	hr	643.25	643.28	643.4
	Energía anual	kWh	9345.29	10230.7	8986.43
3°	Potencia de la red	kW	19.66	19.4	20.77
	Horas de operación anual	hr	643.35	643.48	643.35
	Energía anual	kWh	12647.26	12481.55	13365.1
4°	Potencia de la red	kW	14.82	14.82	14.82
	Horas de operación anual	hr	643.39	643.39	643.39
	Energía anual	kWh	9532.96	9532.96	9532.96
5°	Potencia de la red	kW	13.5	15.07	12.95
	Horas de operación anual	hr	643.25	643.28	643.4
	Energía anual	kWh	8681.58	9695.44	8331.31

La energía anual total multiplicado por el factor de energía eléctrica de  $0.615 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$ , nos dio como resultado las emisiones de  $\text{CO}_2$ , en la Tabla 4.115 se muestra el resumen de los cálculos para los cinco escenarios.

**Tabla 4.115: Emisiones de  $\text{CO}_2$  sin VDF para los cinco escenarios**

Parámetros	Unidad	Escenario				
		Primero	Segundo	Tercero	Cuarto	Quinto
Energía anual total	kWh	32837.18	28562.43	38493.91	28598.89	26708.33
Factor de energía eléctrica	$\text{kgCO}_2/\text{kWh}$	0.615	0.615	0.615	0.615	0.615
Emisiones de $\text{CO}_2$	$\text{kgCO}_2$	20194.87	17565.89	23673.75	17588.31	16425.62

Tener una configuración en paralelo conlleva a tener menores costos de energía y emisiones de  $\text{CO}_2$  y es una buena opción al no tener un variador de frecuencia pues se puede trabajar con diferentes requerimientos de caudales para cada turno de riego.

## 4.16. Emisiones de CO<sub>2</sub> con VDF

Los datos de potencia de la red y horas de operación fueron calculados en la sección 4.11 para cada escenario.

### 4.16.1. Bucle abierto

En la Tabla 4.116 se muestra la energía anual con VDF, los resultados fueron para el I, II y III turno con sus respectivas velocidades.

**Tabla 4.116: Energía anual con VDF/bucle abierto para el primer, segundo y tercer escenario**

Escenario	Parámetros	Potencia de la red (kW)	Horas operación anual (hr)	Energía anual (kWh)
1°	Turno I-49	16.42	643.39	10563.22
	Turno II-43.6	12.04	643.39	7748.32
	Turno III-45.7	13.67	643.39	8796.08
2°	Turno I-42.5	9.29	643.25	5975.17
	Turno II-47.4	13.69	643.28	8808.99
	Turno III-41.9	8.54	643.4	5494.07
3°	Turno I-38.6	10.23	643.35	6578.8
	Turno II-44	14.33	643.48	9219.86
	Turno III-46.2	17.75	643.35	11416.7

La energía anual total multiplicado por el factor de energía eléctrica de 0.615 kgCO<sub>2</sub>/kWh, nos dió como resultado las emisiones de CO<sub>2</sub> con VDF, en la Tabla 4.117 se muestra el resumen de los cálculos para los cinco escenarios.

**Tabla 4.117: Emisiones de CO<sub>2</sub> con VDF/bucle abierto para el primer, segundo y tercer escenario**

Parámetros	Unidad	Escenario		
		Primero	Segundo	Tercero
Energía anual total	kWh	27107.62	20278.23	27215.36
Factor de energía eléctrica	kgCO <sub>2</sub> /kWh	0.615	0.615	0.615
Emisiones de CO <sub>2</sub>	kgCO <sub>2</sub>	16671.19	12471.11	16737.44

#### 4.16.2. Bucle cerrado

##### Segundo escenario (Altura dinámica total contante/caudal variable)

En la Tabla 4.118 se muestra la energía anual con VDF para presión constante, presión diferencial lineal y presión diferencial cuadrática, los resultados fueron para el I, II y III turno con sus respectivas velocidades.

**Tabla 4.118: Energía anual con VDF/bucle cerrado para el segundo escenario**

Presión	Parámetros	Potencia de red (kW)	Horas operación anual (hr)	Energía anual (kWh)
constante	Turno I-45.9	15.82	643.25	7226.36
	Turno II-50	15.82	643.28	10178.91
	Turno III-45	10.17	643.4	6541.07
diferencial lineal	Turno I-43.6	9.92	643.25	6381.32
	Turno II-50	15.82	643.28	10178.91
	Turno III-41.8	8.53	643.4	5488.31
diferencial cuadrática	Turno I-43.5	9.85	643.25	6335.51
	Turno II-50	15.82	643.28	10178.91
	Turno III-41.8	8.54	643.4	5494.06

La energía anual total multiplicado por el factor de energía eléctrica de 0.615 kgCO<sub>2</sub>/kWh, nos dio como resultado las emisiones de CO<sub>2</sub> con VDF, en la Tabla 4.119 se muestra el resumen de los cálculos para los tres modos de control.

**Tabla 4.119: Emisiones de CO<sub>2</sub> con VDF/bucle abierto para el segundo escenario**

Parámetros	Unidad	Presión		
		constante	diferencial lineal	diferencial cuadrática
Energía anual total	kWh	23946.34	22048.54	22008.48
Factor de energía eléctrica	kgCO <sub>2</sub> /kWh	0.615	0.615	0.615
Emisiones de CO <sub>2</sub>	kgCO <sub>2</sub>	14727	13559.85	13535.21

##### Tercer escenario (Caudal variable/presión variable)

En la Tabla 4.120 se muestra la energía anual con VDF para presión constante, presión diferencial lineal y presión diferencial cuadrática, los resultados fueron para el I, II y III turno con sus respectivas velocidades.

**Tabla 4.120: Energía anual con VDF/bucle cerrado para el tercer escenario**

Presión	Parámetros	Potencia de red (kW)	Horas operación anual (hr)	Energía anual (kWh)
constante	Turno I-48.5	19.02	643.35	12235.22
	Turno II-48.3	18.53	643.48	11926.45
	Turno III-50	21.86	643.35	14062.52
diferencial lineal	Turno I-46.8	17.24	643.35	11089.31
	Turno II-46.2	16.32	643.48	10504.61
	Turno III-50	21.86	643.35	14062.52
diferencial cuadrática	Turno I-44.7	15.45	643.35	9936.63
	Turno II-44	16.32	643.48	9216.11
	Turno III-50	21.86	643.35	14062.52

La energía anual total multiplicado por el factor de energía eléctrica de 0.615 kgCO<sub>2</sub>/kWh, nos dio como resultado las emisiones de CO<sub>2</sub> con VDF, en la Tabla 4.121 se muestra el resumen de los cálculos para los tres modos de control.

**Tabla 4.121: Emisiones de CO<sub>2</sub> con VDF/bucle abierto del tercer escenario**

Parámetros	Unidad	Presión		
		constante	diferencial lineal	diferencial cuadrática
Energía anual total	kWh	38224.19	35656.44	33215.26
Factor de energía eléctrica	kgCO <sub>2</sub> /kWh	0.615	0.615	0.615
Emisiones de CO <sub>2</sub>	kgCO <sub>2</sub>	23507.88	21928.71	20427.39

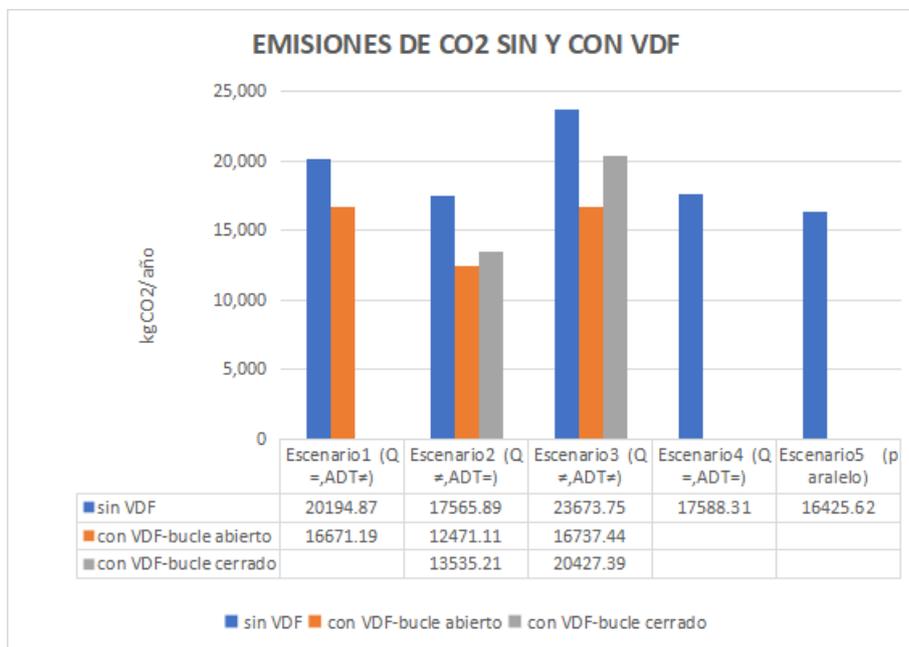
## 4.17. Comparación del CO<sub>2</sub> sin y con el uso del VDF

En la Tabla 4.122 se comparan las emisiones de CO<sub>2</sub> sin y con el VDF para todos los escenarios.

**Tabla 4.122: Emisiones de CO<sub>2</sub> sin y con VDF para todos los escenarios**

Escenario	Descripción	Emisiones de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /año)		
		Sin VDF	Con VDF	Con VDF
			bucle abierto	bucle cerrado
1°	Q=, ADT≠	20194.87	16671.19	-
2°	Q≠, ADT=	17565.89	12471.11	13535.21
3°	Q≠, ADT≠	23673.75	16737.44	20427.39
4°	Q=, ADT=	17588.31	-	-
5°	Paralelo	16425.62	-	-

En la Figura 4.50 se ilustra las emisiones de CO<sub>2</sub> de la Tabla 4.119.



**Figura 4.50: Emisiones de CO<sub>2</sub> sin y con el VDF**

Las menores emisiones sin VDF fueron del quinto escenario, seguidos del segundo escenario y las mayores emisiones fueron del tercer escenario.

Con el uso del VDF en bucle abierto las menores emisiones fueron del segundo escenario y las mayores emisiones fueron del tercer escenario seguidos del primer escenario. En bucle cerrado las menores emisiones fueron del segundo escenario.

El uso de grandes diámetros en la tubería matriz en el segundo y cuarto escenario ocasionó que los costos energéticos y emisiones de CO<sub>2</sub> fueran bajas en comparación con el primer y

tercer escenario donde no se usó grandes diámetros de tuberías ocasionando que los costos y emisiones de  $CO_2$  fueran mayores.

## 4.18. Reducción de emisiones de $CO_2$ con el uso del VDF

### 4.18.1. Bucle abierto

En la Tabla 4.123 se muestra las emisiones de  $CO_2$  sin y con el uso del VDF, la resta de estos dos nos da la reducción de emisiones de  $CO_2$  al usar VDF para los tres primeros escenarios, se tuvo una reducción de emisión para todos los escenarios y el mayor ahorro fue del tercer escenario por tener las emisiones más altas sin el uso del variador de frecuencia.

**Tabla 4.123: Reducción de emisiones de  $CO_2$  con VDF/bucle abierto**

Escenario	Descripción	Emisiones de $CO_2$ (kg $CO_2$ /año)		Reducción de emisiones de $CO_2$	
		Sin VDF	Con VDF	( $S/$ año)	(% año)
1°	Q=, ADT≠	20194.87	16671.19	3523.68	17.45
2°	Q≠, ADT=	17565.89	12471.11	5094.78	29
3°	Q≠, ADT≠	23673.75	16737.44	6936.31	29.3

### 4.18.2. Bucle cerrado

Al tener tres tipos de modos de control para bucle cerrado se especificó la reducción de  $CO_2$  de velocidad constante con los tres modos de control que son presión constante, presión diferencial lineal y presión diferencial cuadrática para el segundo y tercer escenario.

#### Segundo escenario (Altura dinámica total contante/caudal variable)

En la Tabla 4.124 se muestran la reducción de emisiones de  $CO_2$  con el VDF para cada modo de control de bucle cerrado del segundo escenario.

**Tabla 4.124: Reducción de emisión de CO<sub>2</sub> con VDF/bucle cerrado del segundo escenario**

Tipo de control		Emisiones <i>CO</i> <sub>2</sub> (Kg <i>CO</i> <sub>2</sub> )	Reducción vs.(VV/PC) (%)	Reducción vs.(VV/PDL) (%)	Reducción vs.(VV/PDC) (%)
sin	Velocidad cte./	17565.89			
VDF	Caudal variable (VC/VV)				
	Velocidad variable/	14727.00	16.16		
con	Presión.cte (VV/PC)				
VDF	Velocidad variable/	13559.85	22.81	8.61	
(bucle	Presión dif lineal (VV/PDL)				
cerrado)	Velocidad variable/	13535.21	22.95	8.81	0.18
	Presión dif cuadrática (VV/PDC)				

**Tercer escenario (Caudal variable/altura dinámica total variable)**

En la Tabla 4.125 se muestran la reducción de emisiones de *CO*<sub>2</sub> con el VDF para cada modo de control de bucle cerrado.

**Tabla 4.125: Reducción de emisión de CO<sub>2</sub> con VDF/bucle cerrado del tercer escenario**

Tipo de control		Emisiones <i>CO</i> <sub>2</sub> (Kg <i>CO</i> <sub>2</sub> )	Reducción vs.(VV/PC) (%)	Reducción vs.(VV/PDL) (%)	Reducción vs.(VV/PDC) (%)
sin	Velocidad cte./	23673.75			
VDF	Caudal variable (VC/VV)				
	Velocidad variable/	23507.88	0.70		
con	Presión.cte (VV/PC)				
VDF	Velocidad variable/	21928.71	7.37	7.20	
(bucle	Presión dif lineal (VV/PDL)				
cerrado)	Velocidad variable/	20427.39	13.71	15.08	7.35
	Presión dif cuadrática (VV/PDC)				

En la Tabla 4.126 se muestra las emisiones de *CO*<sub>2</sub> sin y con VDF para bucle cerrado y la reducción de emisiones de *CO*<sub>2</sub> para presión diferencial cuadrática que fue la que mayores reducciones de *CO*<sub>2</sub> se tuvo para cada escenario, para los dos escenarios se tuvo una reducción de emisiones *CO*<sub>2</sub> y la mayor reducción fue del segundo escenario debido a que con el VDF se tuvo menores emisiones.

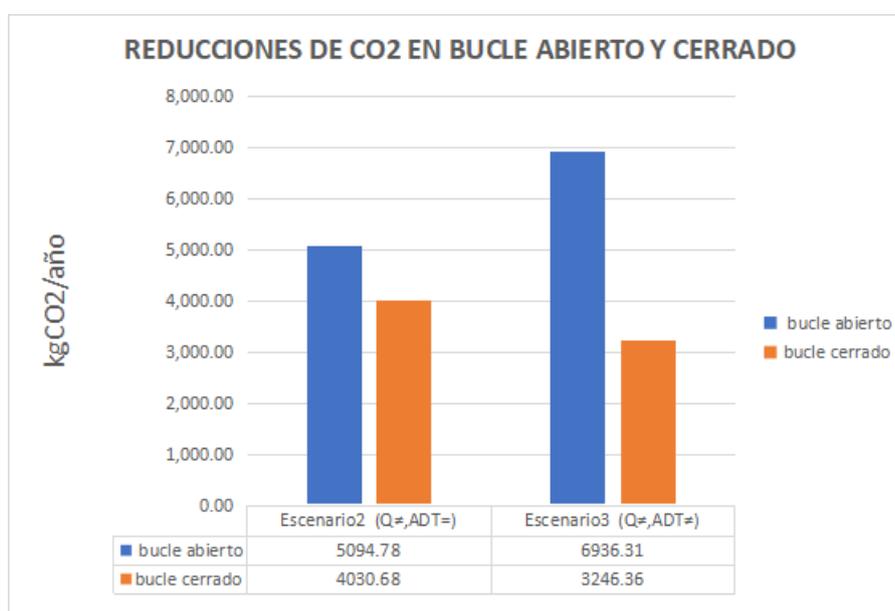
**Tabla 4.126: Reducciones de emisiones de CO<sub>2</sub> con bucle cerrado**

Escenario	Descripción	Emisiones de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /año)		Reducción de emisiones de CO <sub>2</sub>	
		Sin VDF	Con VDF	(S/. año)	(% año)
2°	Q≠, ADT=	17565.89	13535.21	4030.68	22.95
3°	Q≠, ADT≠	23673.75	20427.39	3246.36	13.71

En la Tabla 4.127 se muestra una comparación de reducciones de CO<sub>2</sub> con VDF de bucle cerrado y abierto, las mayores reducciones fueron para bucle abierto de 20.89 % y 53.20 % mayor que bucle cerrado, en la Figura 4.51 se muestra las reducciones de emisiones para bucle cerrado y abierto.

**Tabla 4.127: Comparación de reducciones de emisiones de CO<sub>2</sub> con VDF/bucle abierto y cerrado**

Escenario	Descripción	Reducción de emisiones CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /año)		Reducción respecto a bucle cerrado( %/año)
		bucle abierto	bucle cerrado	
2°	Q≠, ADT=	5094.78	4030.68	20.89
3°	Q≠, ADT≠	6936.31	3246.36	53.2



**Figura 4.51: Reducciones de CO<sub>2</sub> con VDF /bucle abierto y cerrado**

Las reducciones de emisiones en porcentaje tanto para bucle abierto y bucle cerrado tienen los mismos valores que los ahorros en costos energéticos en porcentaje calculados en el punto 4.17 pues al multiplicar por el factor de energía eléctrica de 0.615 kgCO<sub>2</sub>/kWh a los dos valores que son sin el uso de VDF y con el uso de VDF el valor de reducción en porcentaje

continua igual.

El modo de control por bucle abierto nos brindó mayores ahorros en energía y reducciones de  $CO_2$  porque el motor gira a la velocidad exacta en el que se encuentra en punto de operación, pero se realiza un cálculo previo para conocer la velocidad de giro, en cambio el modo de control por bucle cerrado no se necesita realizar un cálculo previo porque tiene sensores de presión en la bomba pero al tener diferentes funcionamientos controlados el giro de la bomba no es el exacto para cada punto de operación.

## V. CONCLUSIONES

1. En el diseño del sistema de riego presurizado, la eficiencia de riego es propuesta en el diseño agronómico y se debe conocer el requerimiento de agua del cultivo (Etc), el coeficiente de uniformidad, la calidad del agua de riego y la sensibilidad del cultivo a las sales. Para el presente caso se consideró un coeficiente de uniformidad de 99 %, una calidad de agua de 0.5 mmhos/cm y la sensibilidad del cultivo del cultivo de palto a las sales en el extracto de saturación de 1.5 mmhos/cm, se obtuvo una eficiencia de riego esperada de 80 %.

La eficiencia de energía del sistema de riego presurizado depende de la adecuada selección de la bomba, motor y del variador de frecuencia, además se debe asegurar que los caudales estén dentro de la región de operación permisible de la bomba. Para evitar el uso excesivo de la potencia energética, ahorrar energía y emitir bajas cantidades de  $CO_2$ , se debe conocer el requerimiento bruto del cultivo, seleccionar emisores de baja presión de trabajo, realizar una adecuada selección de tuberías en las redes y cabezal. En el presente caso la presión de trabajo del gotero fue de 10 metros, la velocidad máxima permisible de las tuberías matrices fue de 2 m/s, las bombas de altas eficiencias y motores de eficiencia premium (IE3).

2. Sin variador de frecuencia el mayor valor de eficiencia energética promedio fue del primer escenario (caudales constantes y alturas dinámicas totales variables) con un valor de 74.22 % y el menor valor de eficiencia energética promedio fue del quinto escenario (bombas en paralelo) con un valor de 64.57 %. El menor costo energético y emisiones de  $CO_2$  fue del quinto escenario (bombas en paralelo) con valores de S/.7344.79 /año y 16425.62 kg  $CO_2$ /año. El mayor costo energético y emisiones de  $CO_2$  fue del tercer escenario (caudal variable y altura dinámica variable) con valores de S/.10585.67 / año y 23673.75 kg  $CO_2$ /año.

Con el uso del variador de frecuencia por bucle abierto, el mayor valor de eficiencia energética promedio fue del primer escenario (caudales constantes y alturas dinámicas totales variables) con un valor de 73.90 % y el menor valor de eficiencia energética promedio fue del segundo escenario (caudales variables y alturas dinámicas totales constantes) con un valor de 72.65 %. El menor costo energético y emisiones de  $CO_2$  fue del segundo escenario (caudales variables y alturas dinámicas totales constantes) con valores de S/. 5576.51/año y 12471.11 kg  $CO_2$ /año. El mayor costo energético y emisiones de  $CO_2$  fue del tercer escenario (caudales variables y alturas dinámicas totales variables) con valores de S/. 7484.22/año y 16737.44 kg  $CO_2$ /año. El uso del variador de frecuencia disminuye los costos de energía y emisiones de  $CO_2$ .

Los ahorros energéticos y reducciones de emisiones para el primer, segundo y tercer escenario con variador de frecuencia fueron de 17.45 %/año, 29.00 %/año y 29.30 %/año respectivamente.

## VI. RECOMENDACIONES

1. Trabajar los puntos de operación en la región de operación permitida para mayores eficiencias en la bomba por lo que será necesario rediseñar a partir de la planificación de los turnos de riego y su distribución dentro del campo.
2. Cambiar el tipo de bombas IE3 por bombas IE4 o IE5 para conocer en cuanto más se reduce los costos de energía y las emisiones de  $CO_2$ .
3. Utilizar otra marca distinta a la de Grundfos en bombas, motores y variadores de frecuencia para conocer la variabilidad en los costos de energía y emisiones de  $CO_2$ .

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- Abadía, R., Vera, J., Rocamora, C., and Puerto, H. (2018). Generalisation of supply energy efficiency in irrigation distribution networks. *biosystems engineering*, 175:146–155. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.09.010>
- ABB (2014). Motores de baja tensión la guía del motor.
- AERP (2013). Riego presurizado.
- AISO (2018). Dióxido de carbono equivalente, para todos los gei – aiso.
- AkzoNobel (2016). Best practice variable speed pump systems. 12.
- Alirio, E. (2013). Riego por goteo.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., et al. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Roma: FAO*, 298(0).
- Antúnez, A., Mora, D., and Felmer, S. (2010). Eficiencia en sistemas de riego por goteo en el secano. *INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias-CL)*. Recuperado de <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/ta/NR36672.pdf>
- ATECYR (2012). Guía técnica de selección de equipos de transporte de fluidos. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53. Recuperado de <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- AZUD (2018). Empleo de variadores en bombeos agrícolas.
- Barreda Trujillo, Á. U. (2012). Método práctico de obtención de potencia y eficiencias de unidades de bombeo en operación. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 33(3):86–97. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v33n3/riha07312.pdf>

- Blanco, E., V. S. . F. J. (2018). Manual de optimización de sistemas de bombeo. page 183.
- Chavez, N. (2014). Datos técnicos de hidráulica- bombas.
- Cifuentes, R. (2020). Región permitida vs región preferida de operación.
- Cuartero Abengózar, H., . P. M. M. (2015). Guía de gestión energética en zonas verdes y campos de golf.
- de Extensión Rural Pocito, A. (2013). Riego presurizado.
- Díez, P. F. (2007). Bombas centrífugas y volumétricas. *BOMBAS CENTRÍFUGAS Y VOLU-MÉTRICAS*, 100.
- Earth, G. (2019). Variadores de frecuencia.
- ENEL (2021). Tarifa para la venta de energía eléctrica.
- F.D.E.M., A. (n.d.). Sigma mini.
- Fernández Díez, P. (2000). Bombas centrífugas y volumétricas.
- Fernández Gómez, R. (2010). Manual de riego para agricultores modulo 4.riego localizado.
- GCCICC (2011). Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). pages 0–66. Recuperado de <http://www.caib.es/sacmicrofront/archivopub.do?ctrl=MCRST234ZI97531&id=97531>
- Grundfos (n.d.). Grundfos cue-frequency converters for pump control. page 61.
- Guatemala (2010). Ahorro de energía eléctrica mediante motores eléctricos de alta eficiencia. pages 1–21.
- Herrera, M. and Narrea, M. (2011). Manejo integrado de palto. *Guía técnica curso-taller. Jornada de capacitación UNALM-Agrobanco. Moquegua-Perú.*
- IANS (2012). American national standard for rotodynamic (centrifugal and vertical) pumps. page 23.
- IDAE (2005). Ahorro y eficiencia energética en agricultura de regadío.

- IDAE (2008). Ahorro y eficiencia energética en las comunidades de regantes. *Ahorro y Eficiencia Energética en la Agricultura*, 9.
- INEI (2012). IV censo nacional. *Artículo*, 47.
- Informativa, F., I. I. F. I. (n.d.). La huella de carbono y la eficiencia energética.
- Liotta, M. (2006). Evaluación del coeficiente de uniformidad en equipos de riego presurizado. *INTA*. Recuperado de [http://www.inta.gov.ar/sanjuan/info/documentos/reclnat/EVALUACION % 20DE](http://www.inta.gov.ar/sanjuan/info/documentos/reclnat/EVALUACION%20DE), 20.
- Liotta, M. A., Carrión, R. A., Ciancaglini, N., Olguin Pringles, A. (2015). Riego por goteo. Technical report, PROSAP; INTA. Recuperado de [https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta\\_manual\\_riego\\_por\\_goteo.pdf%0Afile:///C:/Users/SURI/OneDrive/Documentos/inta\\_manual\\_riego\\_por\\_goteo.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_manual_riego_por_goteo.pdf%0Afile:///C:/Users/SURI/OneDrive/Documentos/inta_manual_riego_por_goteo.pdf)
- Mancha, C. (2005). Fertirrigación 1.
- Martínez Valdés, Y. and Riaño Valle, F. (2010). Características peculiares de la operación de bombas rotodinámicas en paralelo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(2):38–43.
- Martínez Valdés, Y. Riaño Valle, F. (2018). Deducción analítica de las curvas características de las bombas rotodinámicas en paralelo. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1):112–126.
- Marvello Pérez, R. (2015). Funcionamiento de bombas rotodinámicas.
- MINAGRI (2019). Análisis de mercado de la palta 2015 - 2019.
- MINAM (2016). La contribución nacional del Perú: agenda para un desarrollo climáticamente responsable. Recuperado de <https://www.minam.gob.pe/cambioclimatico/wp-content/uploads/sites/11/2015/12/LA-CONTRIBUCIÓN-NACIONAL-DEL-PERÚ1.pdf>
- MINAM (2021). Inventario nacional de gases de efecto invernadero del año 2000, 2005, 2010, 2012 y 2014. *INGEI*, page 477. Recuperado de <http://www.ambiente.gob.ec/el-ministerio/>

- MINEM (2021). Principales indicadores del sector eléctrico a nivel nacional.
- Monge Redondo, M. A. (2019). Prontuario de diseño hidráulico para riego por goteo (1a parte). Recuperado de <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/prontuario-diseno-hidraulico-riego-goteo-1a-parte>
- Narvaez, P. Galvano, H. (2002). Ecuación de costos.
- USDA (2011). Variadores de frecuencia. *Sistemas de Regulacion y Control Automaticos*, pages 143–152. Recuperado de [http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcs144p2\\_054026.pdf](http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs144p2_054026.pdf)
- OSINERGMIN (2016). La industria de la electricidad en el Perú osinergmin 25 años. Technical report. Recuperado de [http://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro\\_documental/Institucional/Estudios\\_Economicos/Libros/Osinergmin-Industria-Electricidad-Peru-25anos.pdf](http://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Osinergmin-Industria-Electricidad-Peru-25anos.pdf)
- Pizarro Cabello, F. (1996). Riegos localizados de alta frecuencia (rlat) goteo, microaspersión exudación/por fernando pizarro cabello. Technical report.
- Rodrigues, I. P., Moreira, J. F. (2002). Inventario nacional de gases de efecto invernadero. page 328.
- Romero, C. A. (2019). La situación del mercado internacional de la palta. page 41.
- S.A., N. P. (2006). Catálogo de tubos y accesorios pvc u presión: Ntp-iso 4422.
- Shankar, V. A., Umashankar, S., Paramasivam, S., Norbert, H. (2017). Real time simulation of variable speed parallel pumping system. *Energy Procedia*, 142:2102–2108. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.612>
- SIAR (2009). Eficiencia energética en instalaciones de riego. *Hoja Informativa*, 17.
- Socorro Santos Acevedo, M., De Leon Benitez, C. A., Cabral Leite, J., Perez Abril, I. (2016). Procedimiento para el análisis energético de sistemas de bombeo centrífugos. *Dyna*.
- Sonowal, A., Senapati, S., Adamala, S. (2016). A mathematical model for the selection of an economical pipe size in pressurized irrigation systems. *African Journal of Agricultural Research*, 11(8):683–692.

Stewart, M. (2019). Centrifugal pumps. *Surface Production Operations*, 4:61–309.

USDA (2014). Variable speed drive for irrigation pumping. *Natural Resources Conservation Service, Engineerig*, 36.

## **VIII. ANEXOS**

# ANEXO 1: Análisis de agua rutina para el canal de riego UNALM



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**  
**DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS**  
**LABORATORIO DE AGUA, SUELO, MEDIO AMBIENTE Y FERTIRRIGACIÓN**

Av. La Molina s/n. Telefax: 6147800 Anexo 226 Lima. E-mail: las-fla@lamolina.edu.pe

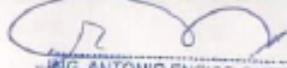


## ANALISIS DE AGUA RUTINA

SOLICITANTE : UNALM  
 PROCEDENCIA : Canal de Riego UNALM, La Molina - Lima  
 FECHA : La Molina, 25 de Enero del 2011

Nº LABORATORIO	002573
Nº DE CAMPO	TRAMO FINAL - PUNTO 2
CE dS/m	0.50
pH	7.51
Calcio meq/l	3.35
Magnesio meq/l	0.78
Sodio meq/l	0.83
Potasio meq/l	0.10
SUMA DE CATIONES	5.06
Cloruro meq/l	0.84
Sulfato meq/l	0.62
Bicarbonato meq/l	3.50
Nitratos meq/l	0.02
Carbonatos meq/l	0.00
SUMA DE ANIONES	4.99
SAR	0.57
CLASIFICACION	C2-S1
Hierro ppm	0.00
Fierro mg/L	0.14
Cobre mg/L	<0.035
Zinc mg/L	0.03
Manganeso mg/L	<0.03
Piomo mg/L	<0.3
Cadmio mg/L	<0.012
Cromo mg/L	0.247
Dureza Total mg CaCO3/L	206.23
Alcalinidad Total mg CaCO3/L	175.12
Sólidos Suspensidos mg/L	33.13
Sólidos Sedimentables mL/Hr	0.20
Sólidos Totales mg/L	352.00
DQO mgO <sub>2</sub> /L	23.61
Oxígeno disuelto mgO <sub>2</sub> /L	8.40

LABORATORIO DE ANALISIS DE AGUA Y SUELO



JRG. ANTONIO ENCISO GUTIERREZ  
JEFE DE LABORATORIO



# ANEXO 2: Ficha técnica del gotero AZUD Premier PC AS 20

Modelo AZUD PREMIER PC AS	AZUD PREMIER PC AS 16						AZUD PREMIER PC AS 20						
	1L	1.6L	2L	2.3L	3L	3.5L	1L	1.6L	2L	2.3L	3L	3.5L	
Caudal nominal	Vh   gph	0.9   0.24	1.5   0.39	1.9   0.50	2.2   0.58	2.9   0.77	3.4   0.90	0.9   0.24	1.5   0.39	1.9   0.50	2.2   0.58	2.9   0.77	3.4   0.90
Díámetro Interior	mm   in	13.7   0.54						17.2   0.68					
Espesor nominal AZUD PREMIER	mm   mil	0.9   35		1.0   39		1.1   43		1.1   43					
Espesor nominal AZUD PREMIER RD	mm   mil	1.1   43			1.2   47			1.1   43			1.2   47		
Presión máxima	bar   psi	4.0   58						4.0   58					

ISO 9251

Modelo AZUD PREMIER PC AS	Modelos	Ecuación característica AZUD PREMIER $q = K \cdot h^2$		Presión de trabajo	
		q (l/h) - h (mca)	q (gph) - h (psi)	bar	psi
AZUD PREMIER PC AS	1L	$q = 0.9 \cdot h^2$	$q = 0.24 \cdot h^2$	0.5 - 4.0	7 - 58 psi
AZUD PREMIER PC AS	1.6L	$q = 1.5 \cdot h^2$	$q = 0.39 \cdot h^2$	0.5 - 4.0	7 - 58 psi
AZUD PREMIER PC AS	2L	$q = 1.9 \cdot h^2$	$q = 0.50 \cdot h^2$	0.5 - 4.0	7 - 58 psi
AZUD PREMIER PC AS	2.3L	$q = 2.2 \cdot h^2$	$q = 0.58 \cdot h^2$	0.5 - 4.0	7 - 58 psi
AZUD PREMIER PC AS	3L	$q = 2.9 \cdot h^2$	$q = 0.77 \cdot h^2$	0.5 - 4.0	7 - 58 psi
AZUD PREMIER PC AS	3.5L	$q = 3.4 \cdot h^2$	$q = 0.90 \cdot h^2$	0.5 - 4.0	7 - 58 psi

Modelo AZUD PREMIER PC AS							
Díámetro nominal		Espesor de pared		Longitud estándar de bobina		Bobinas por contenedor	Bobinas por contenedor
(mm)	(in)	(mm)	(mil)	(m)	(pies)	20 pies	HC 40 pies
16	0.630	0.90	35	500	1640	147	384
16	0.630	1.00	39	500	1640	147	384
16	0.630	1.10	43	500	1640	147	384
20	0.787	1.10	43	300	984	189	432

Modelo AZUD PREMIER PC AS RD							
Díámetro nominal		Espesor de pared		Longitud estándar de bobina		Bobinas por contenedor	Bobinas por contenedor
(mm)	(in)	(mm)	(mil)	(m)	(pies)	20 pies	HC 40 pies
16	0.630	1.10	43	400	1312	147	384
16	0.630	1.20	47	400	1312	147	384
20	0.787	1.10	43	250	820	147	384
20	0.787	1.20	47	250	820	147	384

## **ANEXO 3: Diseño hidráulico**

**Anexo 3.1: Presión y caudales en laterales del 2 diseño**

Turno	Subunidad	Portalateral	Lateral	Nº goteros	D.int (mm)	Q lateral (l/s)	L.eq (m)	J (m/100m)	J' (m/100m)	F (n)	hf (m)	hm (m)	h inicio (m)
I	1	148	92	229	17.2	0.12	0.1	2.41	3.01	0.35	0.97	10	10.71
	2	148	66	165	17.2	0.09	0.1	1.31	1.63	0.35	0.38	10	10.28
	3	148	66	165	17.2	0.09	0.1	1.31	1.63	0.35	0.38	10	10.28
	4	148	66	165	17.2	0.09	0.1	1.31	1.63	0.35	0.38	10	10.28
	5	148	66	165	17.2	0.09	0.1	1.31	1.63	0.35	0.38	10	10.28
II	6	112	64	161	17.2	0.08	0.1	1.25	1.57	0.35	0.36	10	10.26
	7	112	96	241	17.2	0.13	0.1	2.65	3.32	0.35	1.13	10	10.83
	8	112	97	241	17.2	0.13	0.1	2.66	3.32	0.35	1.13	10	10.83
	9	112	97	241	17.2	0.13	0.1	2.66	3.32	0.35	1.13	10	10.83
	10	91	76	191	17.2	0.1	0.1	1.72	2.15	0.35	0.58	10	10.42
III	11	112	93	233	17.2	0.12	0.1	2.48	3.1	0.35	1.02	10	10.75
	12	107	85	212	17.2	0.11	0.1	2.08	2.6	0.35	0.78	10	10.57
	13	85	72	180	17.2	0.1	0.1	1.55	1.93	0.35	0.49	10	10.36
	14	152	87	217	17.2	0.11	0.1	2.17	2.72	0.35	0.83	10	10.61
	15	127	86	216	17.2	0.11	0.1	2.16	2.71	0.35	0.83	10	10.61
	16	136	108	271	17.2	0.14	0.1	3.29	4.12	0.35	1.57	10	11.15

**Anexo 3.2:** Presión y caudales en la entrada de las subunidades del 2do diseño

Turno	Sbd	Área. Sbd (ha)	Área Turno (ha)	Porta lateral (m)	Nº laterales	Q lat (l/s)	Q sbd (l/s)	D int (mm)	J (m/100m)	F (n)	hf - dist (m)	hf - sbd (m)	h lateral inicio (m)	hm. dist (m)
I	1	1.12	5.24	148	50	0.12	4.93	85.6	0.83	0.36	0.3	1.27	10.71	11.67
	2	1.03		148	50	0.09	4.53	85.6	0.71	0.36	0.26	0.64	10.28	10.76
	3	1.03		148	50	0.09	4.53	85.6	0.71	0.36	0.26	0.64	10.28	10.76
	4	1.03		148	50	0.09	4.53	85.6	0.71	0.36	0.26	0.64	10.28	10.76
	5	1.03		148	50	0.09	4.53	85.6	0.71	0.36	0.26	0.64	10.28	10.76
II	6	1.18	7.35	112	38	0.08	5.19	85.6	0.91	0.36	0.33	0.69	10.26	10.78
	7	1.05		112	38	0.13	4.62	85.6	0.74	0.36	0.27	1.4	10.83	11.88
	8	1.09		112	38	0.13	4.79	85.6	0.79	0.36	0.29	1.42	10.83	11.89
	9	1.09		112	38	0.13	4.79	85.6	0.79	0.36	0.29	1.42	10.83	11.89
	10	1.14		91	32	0.1	5.01	85.6	0.86	0.37	0.31	0.89	10.42	11.09
	11	1.04		112	38	0.12	4.57	85.6	0.72	0.36	0.26	1.28	10.75	11.71
	12	0.76		107	36	0.11	3.34	85.6	0.4	0.36	0.15	0.93	10.57	11.27
	13	1.05	4.6	85	30	0.1	4.62	85.6	0.74	0.37	0.27	0.76	10.36	10.94
	14	1.4		152	52	0.11	6.16	85.6	1.26	0.36	0.45	1.29	10.61	11.57
15	0.99		127	44	0.11	4.35	85.6	0.66	0.36	0.24	1.07	10.61	11.4	
16	1.16		136	46	0.14	5.1	85.6	0.89	0.36	0.32	1.89	11.15	12.57	

**Anexo 3.3: Presión y caudales en laterales del 3er diseño**

Turno	Subunidad	Portalateral	Lateral	Nº goteros	D.int (mm)	Q lateral (l/s)	L.eq (m)	J (m/100m)	J' (m/100m)	F (n)	hf (m)	hm (m)	h inicio (m)
I	1	102	67	167	17.2	0.09	0.1	1.34	1.67	0.35	0.4	10	10.29
	2	93	81	201	17.2	0.11	0.1	1.9	2.37	0.35	0.67	10	10.49
	3	93	81	201	17.2	0.11	0.1	1.9	2.37	0.35	0.67	10	10.49
	4	93	81	201	17.2	0.11	0.1	1.9	2.37	0.35	0.67	10	10.49
	5	93	81	201	17.2	0.11	0.1	1.9	2.37	0.35	0.67	10	10.49
	6	93	81	201	17.2	0.11	0.1	1.9	2.37	0.35	0.67	10	10.49
	7	93	81	201	17.2	0.11	0.1	1.9	2.37	0.35	0.67	10	10.49
II	8	173	100	249	17.2	0.13	0.1	2.82	3.53	0.35	1.24	10	10.91
	9	173	100	249	17.2	0.13	0.1	2.82	3.53	0.35	1.24	10	10.91
	10	87	201	503	17.2	0.27	0.1	10.36	12.95	0.35	9.17	10	16.72
	11	116	81	203	17.2	0.11	0.1	1.92	2.4	0.35	0.69	10	10.5
III	12	139	81	203	17.2	0.11	0.1	1.92	2.4	0.35	0.69	10	10.5
	13	76	147	367	17.2	0.19	0.1	5.78	7.23	0.35	3.74	10	12.74
	14	139	76	191	17.2	0.1	0.1	1.72	2.14	0.35	0.58	10	10.42
	15	122	116	290	17.2	0.15	0.1	3.72	4.66	0.35	1.9	10	11.39
	16	99	166	415	17.2	0.22	0.1	7.27	9.09	0.35	5.32	10	13.9

**Anexo 3.4:** Presión y caudales en la entrada de las subunidades del 3er diseño

Turno	Sbd	Área. Sbd (ha)	Área Turno (ha)	Porta lateral (m)	N° laterales	Q lat (l/s)	Q sbd (l/s)	D int (mm)	J (m/100m)	F (n)	hf - dist (m)	hf - sbd (m)	h lateral inicio (m)	hm. dist (m)
I	1	0.65	5.45	102	34	0.09	2.86	85.6	0.3	0.37	0.11	0.51	10.29	10.67
	2	0.8		93	32	0.11	3.52	85.6	0.44	0.37	0.16	0.84	10.49	11.12
	3	0.8		93	32	0.11	3.52	85.6	0.44	0.37	0.16	0.84	10.49	11.12
	4	0.8		93	32	0.11	3.52	85.6	0.44	0.37	0.16	0.84	10.49	11.12
	5	0.8		93	32	0.11	3.52	85.6	0.44	0.37	0.16	0.84	10.49	11.12
	6	0.8		93	32	0.11	3.52	85.6	0.44	0.37	0.16	0.84	10.49	11.12
	7	0.8		93	32	0.11	3.52	85.6	0.44	0.37	0.16	0.84	10.49	11.12
II	8	1.72	5.21	173	58	0.13	7.56	85.6	1.84	0.36	0.66	1.9	10.91	12.34
	9	1.78		173	58	0.13	7.83	85.6	1.96	0.36	0.71	1.95	10.91	12.37
III	10	1.71		87	30	0.27	7.52	85.6	1.82	0.37	0.67	9.84	16.72	24.1
	11	1.01	6.53	116	40	0.11	4.44	85.6	0.69	0.36	0.25	0.94	10.5	11.2
	12	1.16		139	48	0.11	5.1	85.6	0.89	0.36	0.32	1.01	10.5	11.26
	13	1.09		76	26	0.19	4.79	85.6	0.79	0.37	0.29	4.03	12.74	15.76
	14	1.09		139	48	0.1	4.79	85.6	0.79	0.36	0.29	0.86	10.42	11.07
	15	1		122	42	0.15	4.4	85.6	0.67	0.36	0.24	2.15	11.39	13
	16	1.18		99	34	0.22	5.19	85.6	0.91	0.37	0.33	5.65	13.9	18.14

**Anexo 3.5: Presión y caudales en laterales del 4to diseño**

Turno	Subunidad	Portalateral	Lateral	Nº goteros	D.int (mm)	Q lateral (l/s)	L.eq (m)	J (m/100m)	J' (m/100m)	F (n)	hf (m)	hm (m)	h inicio (m)
I	1	182	135	338	17.2	0.18	0.1	4.95	6.19	0.35	2.94	10	12.16
	2	182	101	252	17.2	0.13	0.1	2.88	3.6	0.35	1.28	10	10.94
	3	182	101	252	17.2	0.13	0.1	2.88	3.6	0.35	1.28	10	10.94
II	4	182	114	285	17.2	0.15	0.1	3.61	4.52	0.35	1.82	10	11.33
	5	182	101	252	17.2	0.13	0.1	2.88	3.61	0.35	1.28	10	10.94
	6	113	86	216	17.2	0.11	0.1	2.15	2.69	0.35	0.82	10	10.6
III	7	81	126	315	17.2	0.17	0.1	4.34	5.43	0.35	2.41	10	11.76
	8	101	126	314	17.2	0.17	0.1	4.33	5.42	0.35	2.4	10	11.76
	9	147	103	256	17.2	0.14	0.1	2.97	3.71	0.35	1.34	10	10.98
	10	140	87	218	17.2	0.11	0.1	2.19	2.74	0.35	0.84	10	10.62
	11	131	121	302	17.2	0.16	0.1	4.01	5.02	0.35	2.13	10	11.56

**Anexo 3.6:** Presión y caudales en la entrada de las subunidades del 4to diseño

Turno	Sbd	Área. Sbd (ha)	Área Turno (ha)	Porta lateral (m)	N° laterales	Q lat (l/s)	Q sbd (l/s)	D int (mm)	J (m/100m)	F (n)	hf - dist (m)	hf - sbd (m)	h lateral inicio (m)	hm. dist (m)
I	1	1.91	5.73	182	62	0.18	8.4	85.6	2.24	0.36	0.8	3.75	12.16	14.97
	2	1.91		182	62	0.13	8.4	85.6	2.24	0.36	0.8	2.09	10.94	12.51
	3	1.91		182	62	0.13	8.4	85.6	2.24	0.36	0.8	2.09	10.94	12.51
II	4	1.91	5.73	182	62	0.15	8.4	85.6	2.24	0.36	0.8	2.62	11.33	13.29
	5	1.91		182	62	0.13	8.4	85.6	2.24	0.36	0.8	2.09	10.94	12.51
	6	0.97		113	38	0.11	4.27	85.6	0.64	0.36	0.23	1.05	10.6	11.39
III	7	0.94		81	28	0.17	4.13	85.6	0.6	0.37	0.22	2.63	11.76	13.74
	8	1.26	5.73	101	34	0.17	5.54	85.6	1.03	0.37	0.38	2.78	11.76	13.85
	9	1.56		147	50	0.14	6.86	85.6	1.54	0.36	0.55	1.9	10.98	12.41
	10	1.46		140	48	0.11	6.38	85.6	1.34	0.36	0.48	1.33	10.62	11.61
	11	1.45		131	44	0.16	6.42	85.6	1.36	0.36	0.49	2.63	11.56	13.53

**Anexo 3.7: Pérdida de carga en el arco de riego por diseño**

N°	Accesorios	Marca	Modelo	Pérdida de carga(m)			
				2do diseño	3er diseño	4to diseño	4to diseño
1	tubería matriz ø 3"	-	-	-	-	-	-
2	tee pvc ø 3"	PAVCO	SP	0.02	0.02	0.01	0.01
3	espiga pvc ø 3"	PAVCO	RDE-26	-	-	0	0
4	tee pvc ø 3"	PAVCO	SP	0.02	0.02	-	-
5	adaptador pvc 3x2 "	PAVCO	SP	0.03	0.03	0.12	0.12
6	válvula de aire de doble efecto 2"	DOROT	DAV	-	-	0.04	0.04
7	adaptador pvc 3x 2"	PAVCO	SP	0.03	0.03	-	-
8	válvula hidráulica 2"	BERMAD	SERIE -100	1.35	1.35	0.9	0.9
9	adaptador pvc 3x1 "	PAVCO	SP	0.01	0.01	0.04	0.04
10	codo pvc ø 3"	PAVCO	SP	0.03	0.03	0.09	0.09
11	válvula de aire cinética 1"	DOROT	DAV	-	-	-	-
Total (m)				1.49	1.49	1.49	1.2

**Anexo 3.8: Pérdida de carga en la carga principal para los tres turnos del 2do diseño**

TURNO	N válvula	Q Q	Q acum	D int	L L	L acum	hf hf	hf acum	V crítica	Obs	Presión sbd (m)	hf arco riego(m)	desnivel tpgf(m)	Presión inicial(m)	Presión final(m)
1	5/4	4.53	4.53	190.2	67.88	67.88	0.01	0.01	0.16	O.K.	10.76	1.5	0	12.26	12.27
	4/3	4.53	9.06	190.2	67.88	135.76	0.04	0.05	0.32	O.K.	12.27	-	0	12.27	12.3
	3/2	4.53	13.59	190.2	67.88	203.64	0.08	0.12	0.48	O.K.	12.3	-	0	12.3	12.38
	2/1	4.53	18.12	190.2	27.6	231.24	0.05	0.18	0.64	O.K.	12.38	-	0	12.38	12.43
	1/A	4.93	23.05	190.2	30.74	261.98	0.09	0.27	0.81	O.K.	13.17	-	0	13.17	13.26
	A/B	0	23.05	190.2	154.42	416.4	0.46	0.73	0.81	O.K.	13.26	-	0	13.26	13.72
2	B/C	0	23.05	190.2	7.36	423.76	0.02	0.76	0.81	O.K.	13.72	-	0	13.72	13.75
	10/11	3.34	3.34	104.6	97	97	0.15	0.15	0.39	O.K.	11.27	1.5	0	12.77	12.92
	11/9	9.59	12.93	190.2	99.59	196.59	0.1	0.25	0.46	O.K.	13.21	-	0	13.21	13.31
	9/6	14.21	27.14	190.2	50.74	247.33	0.21	0.46	0.96	O.K.	13.45	-	0	13.45	13.66
	6/A	5.19	32.33	190.2	8.4	255.73	0.05	0.51	1.14	O.K.	13.66	-	0	13.66	13.7
	A/B	0	32.33	190.2	154.42	410.15	0.87	1.38	1.14	O.K.	13.7	-	0	13.7	14.57
3	B/C	0	32.33	190.2	7.36	417.51	0.04	1.42	1.14	O.K.	14.57	-	0	14.57	14.61
	16/14	9.46	9.46	104.6	88.7	88.7	0.94	0.94	1.1	O.K.	12.57	1.5	0	14.07	15.02
	14/D	10.78	20.23	190.2	3.58	92.28	0.01	0.95	0.71	O.K.	15.02	-	0	15.02	15.03
	D/E	0	20.23	190.2	4	96.28	0.01	0.96	0.71	O.K.	15.03	-	0	15.03	15.04
	E/A	0	20.23	190.2	334.28	430.56	0.79	1.75	0.71	O.K.	15.04	-	0	15.04	15.83
	A/B	0	20.23	190.2	154.42	584.98	0.36	2.12	0.71	O.K.	15.83	-	0	15.83	16.19
B/C	0	20.23	190.2	7.36	592.34	0.02	2.13	0.71	O.K.	16.19	-	0	16.19	16.21	

**Anexo 3.9: Pérdida de carga en la carga principal para los tres turnos del 3er diseño**

TURNO	N válvula	Q Q	Q acum	D int	L L	L acum	hf hf	hf acum	V crítica	Obs	Presión sbd (m)	hf arco riego(m)	desnivel tpgf(m)	Presión inicial(m)	Presión final(m)
1	7/6	3.52	3.52	85.6	102.53	102.53	0.47	0.47	0.61	O.K.	11.12	1.5	0	12.62	13.09
	6/5	3.52	7.04	152	82.55	185.08	0.08	0.55	0.39	O.K.	13.09	-	0	13.09	13.17
	5/2	7.04	14.07	152	82.55	267.63	0.3	0.84	0.78	O.K.	13.17	-	0	13.17	13.47
	2/1	7.04	21.11	152	2	269.63	0.02	0.86	1.16	O.K.	13.47	-	0	13.47	13.48
	1/A	2.86	23.97	152	2	271.63	0.02	0.88	1.32	O.K.	13.48	-	0	13.48	13.5
	A/B	0	23.97	152	197.09	468.72	1.9	2.78	1.32	O.K.	13.5	-	0	13.5	15.4
	B/C	0	23.97	152	7.36	476.08	0.07	2.85	1.32	O.K.	15.4	-	0	15.4	15.47
2	10/D	7.52	7.52	85.6	6.49	6.49	0.12	0.12	1.31	O.K.	24.1	1.5	0	25.6	25.72
	D/9	0	7.52	152	100.67	107.16	0.11	0.23	0.41	O.K.	25.72	-	0	25.72	25.83
	9/8	7.83	15.35	152	4.01	111.17	0.02	0.25	0.85	O.K.	25.83	-	0	25.83	25.85
	8/A	7.56	22.91	152	59.26	170.43	0.53	0.78	1.26	O.K.	25.85	-	0	25.85	26.37
	A/B	0	22.91	152	197.09	367.52	1.75	2.52	1.26	O.K.	26.37	-	0	26.37	28.12
	B/C	0	22.91	152	7.36	374.88	0.07	2.59	1.26	O.K.	28.12	-	0	28.12	28.19
	16/13	9.59	9.59	85.6	78.77	78.77	2.28	2.28	1.67	O.K.	18.14	1.5	0	19.64	21.92
3	13/12	9.59	19.18	152	78.77	84.59	0.5	2.78	1.06	O.K.	21.92	-	0	21.92	22.42
	12/E	9.54	28.72	152	5.82	141.51	0.08	2.86	1.58	O.K.	22.42	-	0	22.42	22.5
	E/F	0	28.72	152	56.92	198.43	0.77	3.63	1.58	O.K.	22.5	-	0	22.5	23.27
	F/A	0	28.72	152	257.48	455.91	3.47	7.1	1.58	O.K.	23.27	-	0	23.27	26.73
	A/B	0	28.72	152	197.09	653	2.65	9.75	1.58	O.K.	26.73	-	0	26.73	29.38
	B/C	0	28.72	152	7.36	660.36	0.1	9.85	1.58	O.K.	29.38	-	0	29.38	29.48

**Anexo 3.10:** Pérdida de carga en la carga principal para los tres turnos del 4to diseño

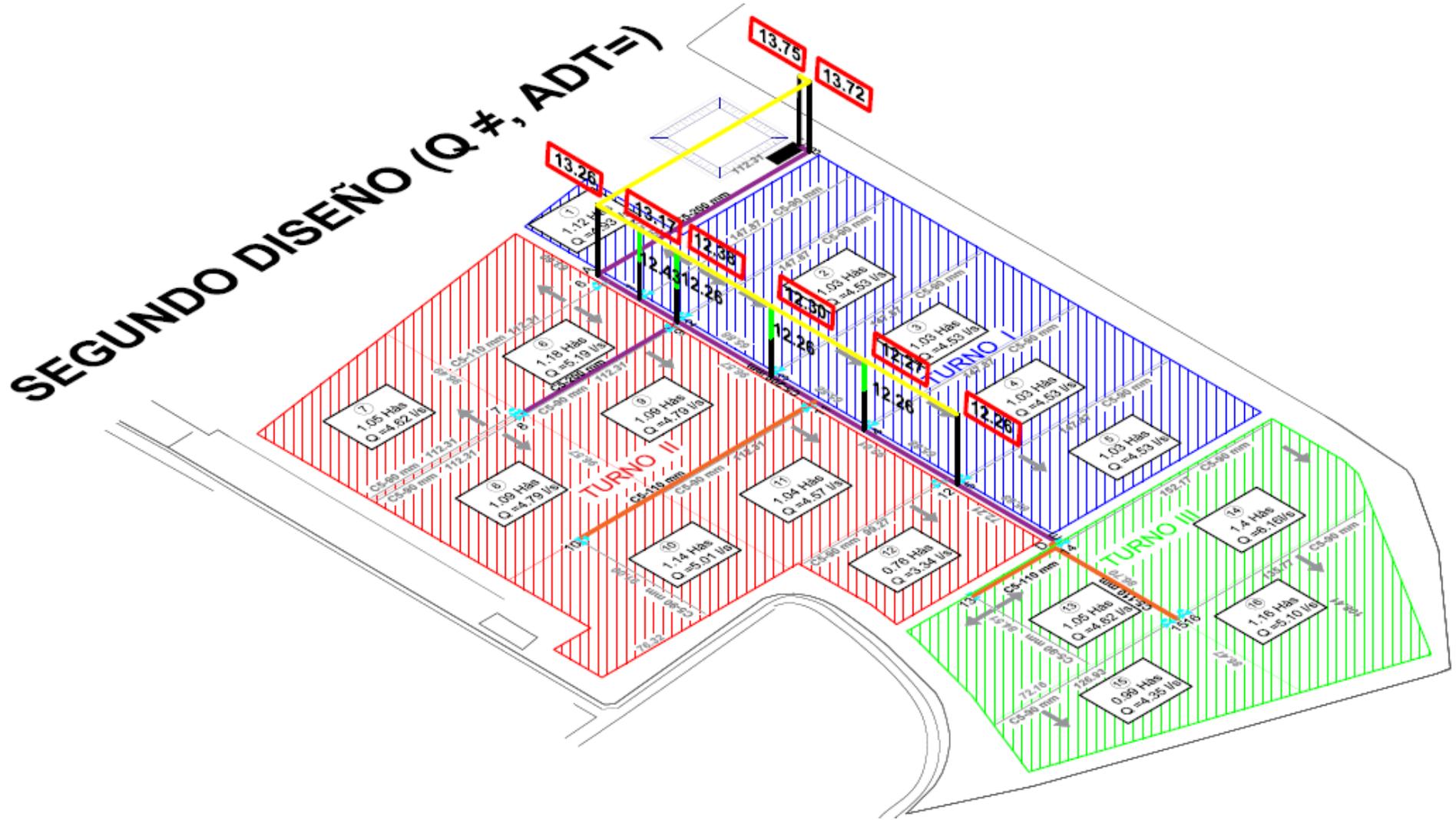
TURNO	N válvula	Q Q	Q acum	D int	L L	L acum	hf	hf	V crítica	Obs	Presión sbd (m)	hf arco	desnivel tpgf(m)	Presión inicial(m)	Presión final(m)
							hf	hf				riego(m)			
1	3/2	8.4	8.4	152	110.49	110.49	0.15	0.15	0.46	O.K.	12.51	1.2	0	13.71	13.86
	2/1	8.4	16.8	152	4.29	114.78	0.02	0.17	0.93	O.K.	13.86	-	0	13.86	13.88
	1/A	8.4	25.2	152	62.32	177.1	0.66	0.83	1.39	O.K.	16.17	-	0	16.17	16.83
	A/B	0	25.2	152	189.29	366.39	2	2.83	1.39	O.K.	16.83	-	0	16.83	18.83
	B/C	0	25.2	152	10.77	377.16	0.11	2.95	1.39	O.K.	18.83	-	0	18.83	18.94
	7/6	4.13	4.13	85.6	91.82	91.82	0.56	0.56	0.72	O.K.	13.74	1.2	0	14.94	15.5
2	6/5	4.27	8.4	152	108.68	200.5	0.15	0.71	0.46	O.K.	15.5	-	0	15.5	15.65
	5/4	8.4	16.8	152	4	204.5	0.02	0.73	0.93	O.K.	15.65	-	0	15.65	15.67
	4/A	8.4	25.2	152	60.52	265.02	0.64	1.37	1.39	O.K.	15.67	-	0	15.67	16.31
	A/B	0	25.2	152	189.29	454.31	2	3.37	1.39	O.K.	16.31	-	0	16.31	18.31
	B/C	0	25.2	152	10.77	465.08	0.11	3.49	1.39	O.K.	18.31	-	0	18.31	18.42
	10/11	6.38	6.38	104.6	59.84	59.84	0.31	0.31	0.74	O.K.	11.61	1.2	0	12.81	13.12
3	11/8	6.42	12.8	152	105.92	165.76	0.32	0.63	0.71	O.K.	14.73	-	0	14.73	15.05
	8/D	12.4	25.2	152	5.71	171.47	0.06	0.37	1.39	O.K.	15.05	-	0	15.05	15.11
	D/F	0	25.2	152	41.48	212.95	0.44	0.81	1.39	O.K.	15.11	-	0	15.11	15.55
	F/A	0	25.2	152	285.51	498.46	3.02	3.82	1.39	O.K.	15.55	-	0	15.55	18.57
	A/B	0	25.2	152	189.29	687.75	2	5.83	1.39	O.K.	18.57	-	0	18.57	20.57
	B/C	0	25.2	152	10.77	698.52	0.11	5.94	1.39	O.K.	20.57	-	0	20.57	20.69

**Anexo 3.11: Costos energéticos**

Los costos energéticos totales para el caso actual del Fundo agrícola fueron de 14524.12 soles al año para las 22.46 ha.

Parámetros	Turno	Turno II	Turno III	Turno IV	Turno V	Turno VI	Turno VII	Turno VIII	Turno IX
Caudal (l/s)	34.03	35.83	36.39	35.14	35.69	35.28	35	36.25	28.33
Altura dinámica total (m)	45.65	44	43.47	44.64	44.13	44.51	44.77	43.6	50.4
Eficiencia de la bomba (%)	80.42	79.92	79.67	80.16	79.97	80.12	80.2	79.73	78.95
Eficiencia del motor (%)	91	91	91	91	91	91	91	91	91
Potencia de la red (kW)	20.81	21.25	21.39	21.08	21.22	21.12	21.05	21.36	19.48
S /. kW - hr	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
Horas de bombeo anual	279.79	279.83	279.8	279.8	279.84	279.79	279.81	279.81	279.84
Costo energético (S/. año)	1601.14	1635.4	1646	1622.03	1632.76	1624.64	1619.43	1643.34	1499.37
Costos energéticos totales (S/. año)	14524.12								

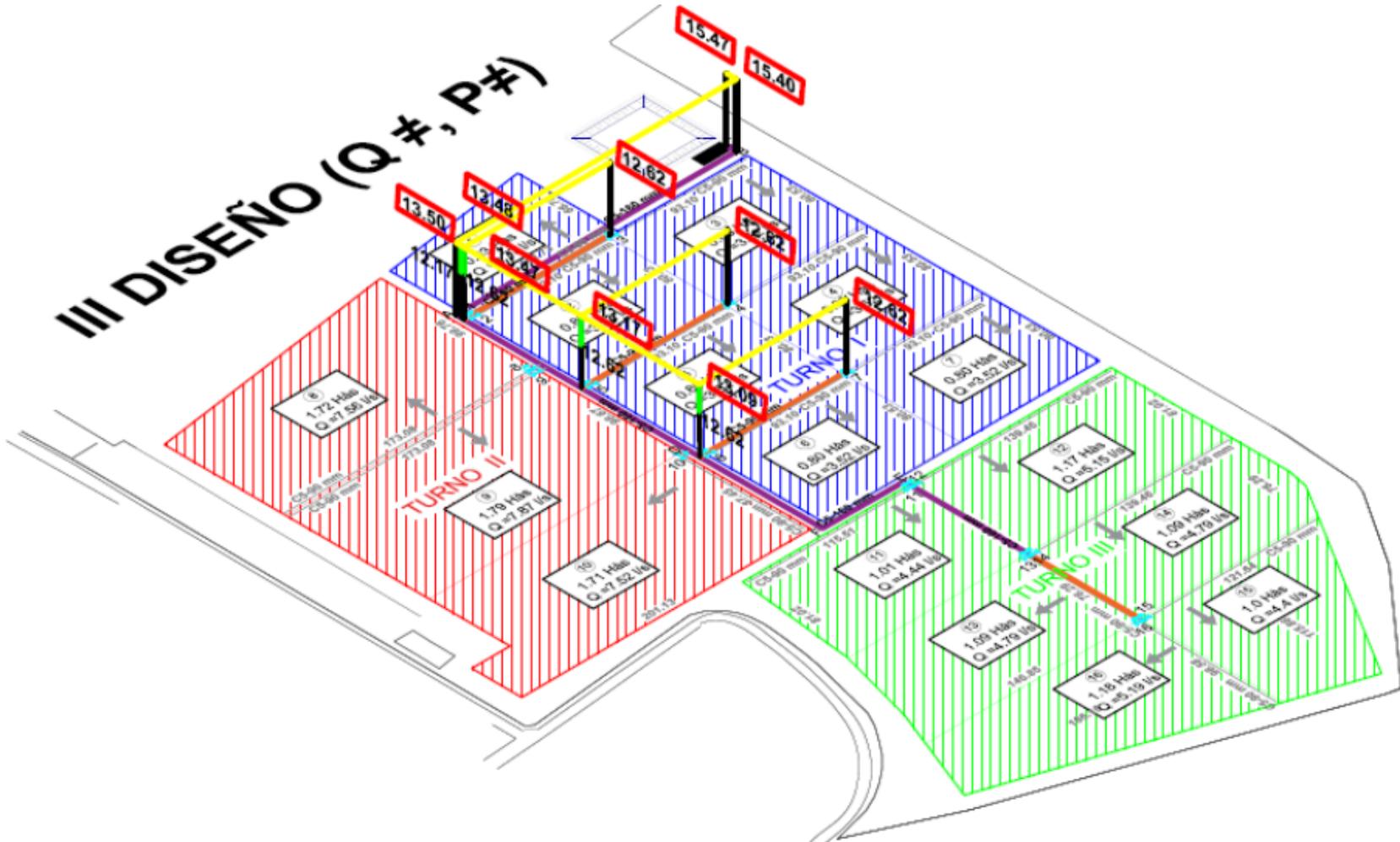
Anexo 3.15: Diagrama de presiones - I Turno del 2do diseño



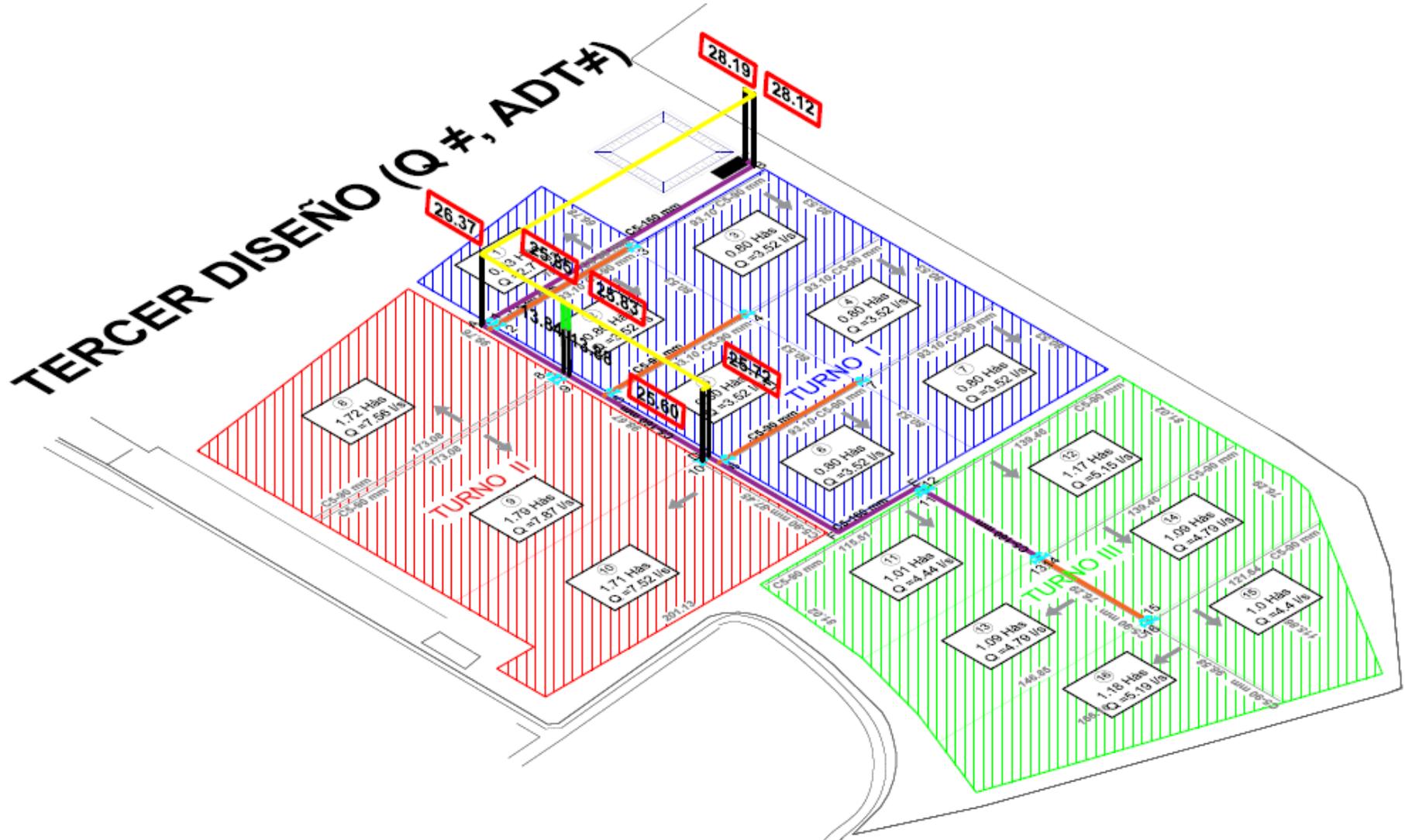




Anexo 3.18: Diagrama de presiones - I Turno del 3er diseño

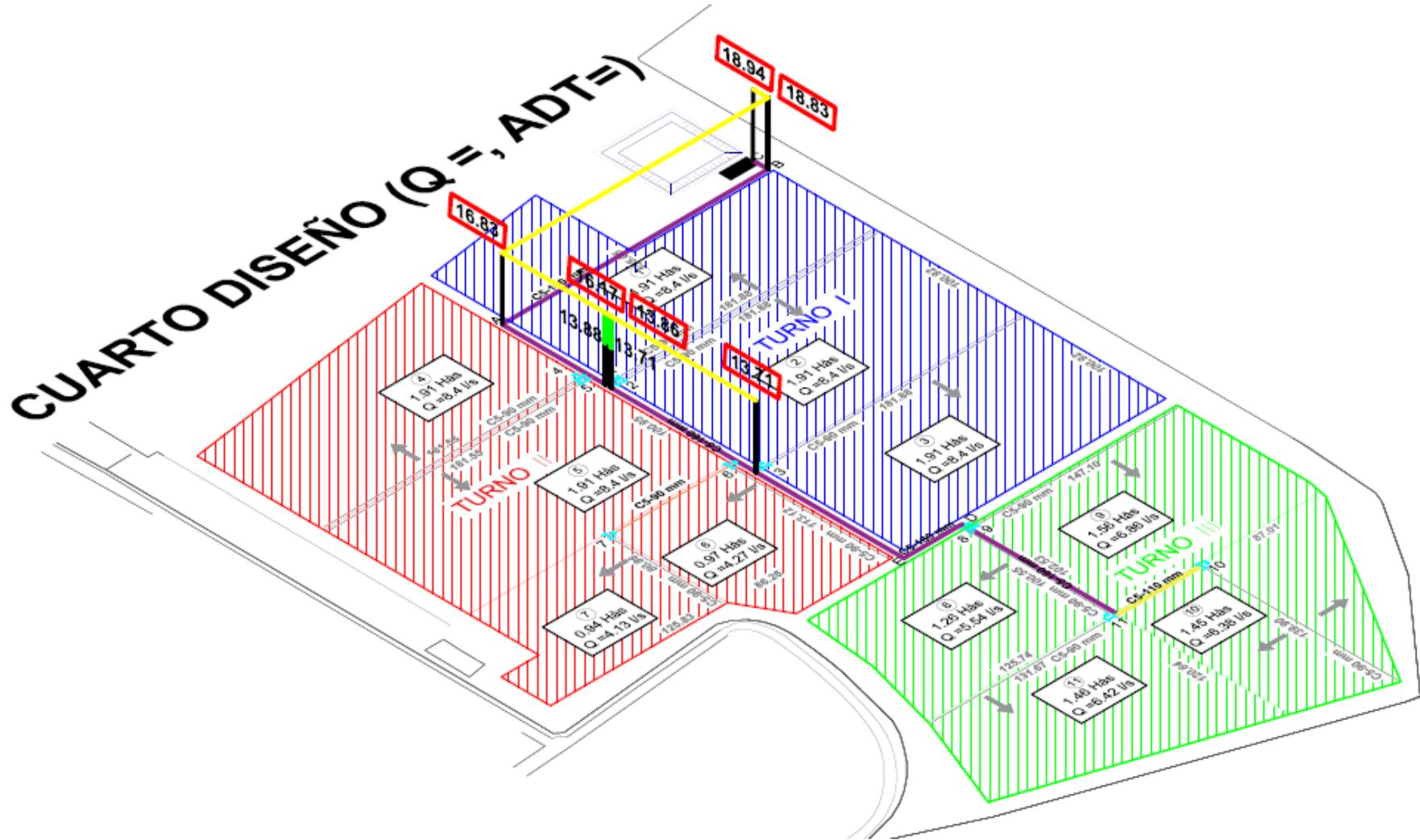


Anexo 3.19: Diagrama de presiones - II Turno del 3er diseño

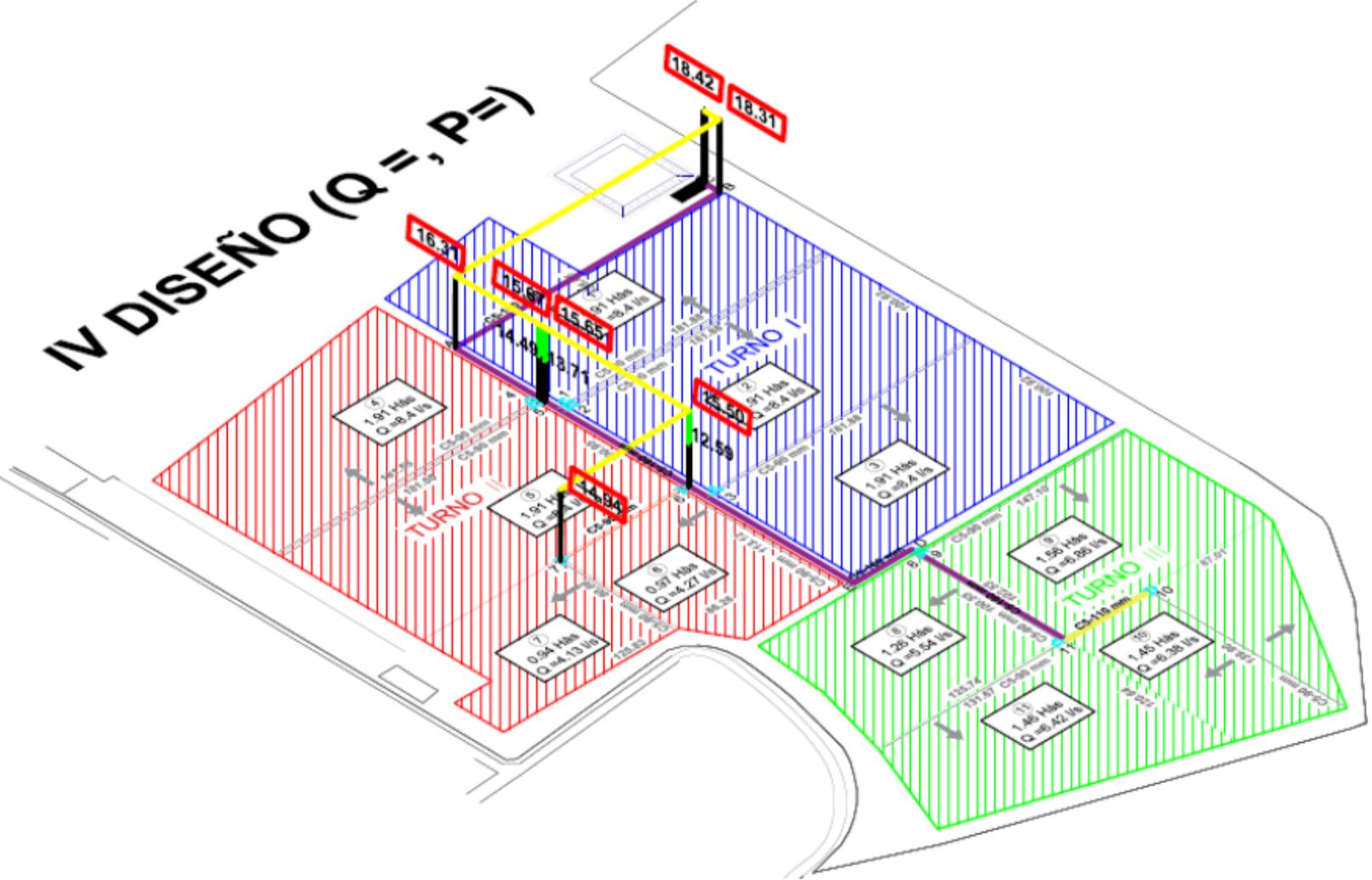




Anexo 3.21: Diagrama de presiones - I Turno del 4to diseño



Anexo 3.22: Diagrama de presiones - II Turno del 4to diseño





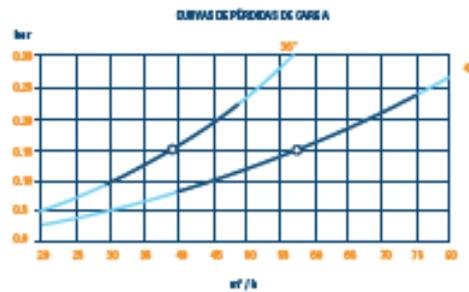
# ANEXO 4: Ficha técnica del filtro de gravas y malla

## Anexo 4.1: Filtro de gravas - NETAFIM



### FILTROS NO CORROSIVOS

RANGO RECOMENDADO —  
PROMEDIO ○



### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL TANQUE

DIÁMETRO DEL TANQUE (in)	PESO DEL TANQUE (Kg)	DIÁMETRO DE ENTRADA Y SALIDA (in)	ÁREA DE FILTRACIÓN (m²)	CANTIDAD DE ARENA (Kg/m³)	RANGOS DE FLUJO RECOMENDADO (m³/h)			PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN (bar)
					MIN.	MAX.	RETRO-LAVADO	
36	180	3	0.64	425	25	48	50	6
48	150	4	1.09	750	40	75	80	6

### CONFIGURACIONES Y CÓDIGOS DE PRODUCTOS

MATERIAL	# DE TANQUES	DESCRIPCIÓN
71124-#10154	2X48	NNC SNG 480308 S A06 BFC DC SOL DC NGR
71124-#10155	3X48	NNC SNG 480308 S A06 BFC DC SOL DC NGR
71124-#10156	4X48	NNC SNG 480408 S A06 BFC DC SOL DC NGR
71124-#10157	5X48	NNC SNG 480508 S A06 BFC DC SOL DC NGR



netafim.mexico@netafim.com

www.netafim-latinamerica.com

## Anexo 4.2: Filtro de mallas - FILTOMAT M100-4500

### Especificaciones técnicas

Tipo de filtro	M100 750	M100 1500	M100 4500	M100 6800
----------------	----------	-----------	-----------	-----------

Datos generales				
Caudal máximo*	40 m <sup>3</sup> /h (175 gpm)	80 m <sup>3</sup> /h (350 gpm)	180 m <sup>3</sup> /h (793 gpm)	400 m <sup>3</sup> /h (1740 gpm)
Diámetro de entrada / salida (mm)	2" 50mm 3" 80mm	3" 80mm 4" 100 mm	4" 100 mm 6" 150 mm	4" 100mm 6" 150mm 8" 200mm 10" 250mm
Grados de filtración estándar	500, 300, 200, 130, 100, 80 micron			
Presión mínima de trabajo	2 bar (30 psi) Para presiones más bajas consulte al fabricante			
Presión máxima de trabajo	8 bar (116 psi)		10 bar (150 psi)	
Temperatura máxima de trabajo	55°C (131°F)			
Peso [vacío]	2" 22 kg (48.5 lb) 3" 25 kg (55 lb)	3" 30 kg (66 lb) 4" 35 kg (77 lb)	4" 90 kg (198 lb) 6" 115 kg (253.5 lb)	4" 110 kg (242.5 lb) 6" 120 kg (264.5 lb) 8" 140 kg (308.6 lb) 10" 158 kg (348 lb)

\* Consulte Amiad para conocer el flujo óptimo que depende del grado de filtración y la calidad del agua.

Datos de lavado				
Flujo mínimo para lavado (a 2 bar - -30 psi)	15 m <sup>3</sup> /h (66 gpm)	20 m <sup>3</sup> /h (88 gpm)	26 m <sup>3</sup> /h (114 gpm)	30 m <sup>3</sup> /h (132 gpm)
Volumen de agua de desecho por ciclo de lavado (a 2 bar -39 psi)	15 litros (4 gal)	20 litros (5.2 gal)	125 litros (33 gal)	150 litros (40 gal)
Tiempo del ciclo de lavado	10 segundos	10 segundos	15 segundos	15 segundos
Válvula de drenaje	1.5" 40 mm	1.5" 40 mm	1.5" 40 mm	1.5" 40 mm
Criterios de lavado	Presión diferencial de 0,5 bar (7 psi), intervalos de tiempo y operación manual			

Datos de la malla				
Área de filtración	750 cm <sup>2</sup> (161 pulg <sup>2</sup> )	750 cm <sup>2</sup> (161 pulg <sup>2</sup> )	4500 cm <sup>2</sup> (698 pulg <sup>2</sup> )	6800 cm <sup>2</sup> (1054 pulg <sup>2</sup> )
Tipos de malla	Alambre tejido de acero inoxidable moldeado 316 L			

# ANEXO 6: Ficha técnica del variador de frecuencia CUE

Anexo 6.1: Variador 3 x 380 -500V IP20 15 kW para el 1 escenario

## Especificaciones

Nombre del producto	SEÑAL 3X380-500V IP20 18,5KW	<b>Instalación</b>	
Ningún producto	99616718	Rango de temperatura ambiente	0 .. 45 ° C
Número EAN	5713831974239	Humedad relativa	5-95%
Precio		Montado en	pared
<b>Técnico</b>		<b>Datos eléctricos</b>	
Aprobaciones en placa de identificación	CE, CULUS, C-TICK	Potencia nominal - P2	18,5 kW
		Frecuencia de red	50/60 Hz
		Voltaje nominal	380-440 / 441-500 V
		Corriente nominal	37,5-34 A
		Consumo máximo de corriente	37,5 A
		Eficiencia a plena carga	98%
		Clase de envolvente (IEC 34-5)	IP20
		Protección del motor	SI
		Protección térmica	externo
		Longitud del cable	150/300 m

## Anexo 6.2: Variador 3 x 380 -500V IP20 15 kW para el 2 escenario

<b>Especificaciones</b>			
Nombre del producto	SEÑAL 3X380-500V IP20 15KW	<b>Instalación</b>	
Ningún producto	99616717	Rango de temperatura ambiente	0 .. 45 ° C
Número EAN	5713831974222	Humedad relativa	5-95%
Precio		Montado en	pared
<b>Técnico</b>		<b>Datos eléctricos</b>	
Aprobaciones en placa de identificación	CE, CULUS, C-TICK	Potencia nominal - P2	15 kW
		Frecuencia de red	50/60 Hz
		Voltaje nominal	380-440 / 441-500 V
		Corriente nominal	32-27 A
		Consumo máximo de corriente	32 A
		Eficiencia a plena carga	98%
		Clase de envolvente (IEC 34-5)	IP20
		Protección del motor	SÍ
		Protección térmica	externo
		Longitud del cable	150/300 m

## Anexo 6.3: Variador 3 x 380 -500V IP20 15 kW para el 3 escenario

<b>Especificaciones</b>			
Nombre del producto	SEÑAL 3X380-500V IP20 22KW	<b>Instalación</b>	
Ningún producto	99616719	Rango de temperatura ambiente	0 .. 45 ° C
Número EAN	5713831974246	Humedad relativa	5-95%
Precio		Montado en	pared
<b>Técnico</b>		<b>Datos eléctricos</b>	
Aprobaciones en placa de identificación	CE, CULUS, C-TICK	Potencia nominal - P2	22 kilovatios
		Frecuencia de red	50/60 Hz
		Voltaje nominal	380-440 / 441-500 V
		Corriente nominal	44-40 A
		Consumo máximo de corriente	44 A
		Eficiencia a plena carga	98%
		Clase de envolvente (IEC 34-5)	IP20
		Protección del motor	SÍ
		Protección térmica	externo
		Longitud del cable	150/300 m

# ANEXO 7: Costos de bomba CR de Grundfos

			MPG 23		
			F		
Cierre mecánico	P2 [kW]	In [A]	Modelo	Código	Euros
<b>3 x 380-415D/660-690Y V</b>					
	15.00	28.0-26.0/16.2-15.6	<b>CR 125-2-2</b>	99142432	<b>11.696,00</b>
HQQE	18.50	34.5-32.5/20.0-18.8	<b>CR 125-2-1</b>	99142573	<b>13.702,00</b>
	22.00	39.5/22.8	<b>CR 125-2</b>	99142574	<b>15.324,00</b>
<b>3 x 380-420D/660-725Y V</b>					
	30.00	56.0-51.0/32.0-29.5	<b>CR 125-3-1</b>	99142575	<b>16.434,00</b>
	37.00	68.0-63.0/39.0-36.0	<b>CR 125-3</b>	99142576	<b>19.208,00</b>
HQQE	37.00	68.0-63.0/39.0-36.0	<b>CR 125-4-2</b>	99142578	<b>20.062,00</b>
	45.00	81.0-74.0/47.0-43.0	<b>CR 125-4</b>	99142579	<b>25.397,00</b>
	55.00	99.0-90.0/57.0-52.0	<b>CR 125-5</b>	99142580	<b>31.160,00</b>

## ANEXO 8: Costos del variador de frecuencia CUE de Grundfos

P2 [kW]	In [A]	Modelo	IP20		IP55		Filtro de salida	
			Código	Euros	Código	Euros	dU/dt	Onda sinusoidal
0.55	1.8	CUE 3x380-500V 0,55kW	99616707	892,00	99616756	1.113,00		Sin. 2.5
0.75	2.4	CUE 3x380-500V 0,75kW	99616708	923,00	99616757	1.151,00		Sin. 2.5
1.10	3	CUE 3x380-500V 1,1kW	99616709	974,00	99616758	1.214,00		Sin. 4.5
1.50	4.1	CUE 3x380-500V 1,5kW	99616710	1.031,00	99616759	1.287,00		Sin. 4.5
2.20	5.6	CUE 3x380-500V 2,2kW	99616711	1.135,00	99616760	1.417,00		Sin. 8
3.00	7.2	CUE 3x380-500V 3,0kW	99616712	1.249,00	99616761	1.559,00		Sin. 8
4.00	10	CUE 3x380-500V 4,0kW	99616713	1.398,00	99616762	1.745,00		Sin. 10
5.50	13	CUE 3x380-500V 5,5kW	99616714	1.616,00	99616763	2.017,00		Sin. 17
7.50	16	CUE 3x380-500V 7,5kW	99616715	1.910,00	99616764	2.384,00		Sin. 17
11.00	24	CUE 3x380-500V 11kW	99616716	2.179,00	99616765	2.722,00	dU/dt 44	Sin. 24
15.00	32	CUE 3x380-500V 15kW	99616717	2.507,00	99616766	3.130,00	dU/dt 44	Sin. 38
18.50	37.5	CUE 3x380-500V 18,5kW	99616718	2.795,00	99616767	3.488,00	dU/dt 44	Sin. 38
22.00	44	CUE 3x380-500V 22kW	99616719	3.083,00	99616769	3.848,00	dU/dt 44	Sin. 48
30.00	61	CUE 3x380-500V 30kW	99616720	3.734,00	99616770	4.667,00	dU/dt 90	Sin. 62
37.00	73	CUE 3x380-500V 37kW	99616721	4.117,00	99616771	5.145,00	dU/dt 90	Sin. 75
45.00	90	CUE 3x380-500V 45kW	99616722	4.553,00	99616772	5.692,00	dU/dt 90	Sin. 115
55.00	106	CUE 3x380-500V 55kW	99616723	5.666,00	99616773	7.083,00	dU/dt 106	Sin. 115
75.00	147	CUE 3x380-500V 75kW	99616724	6.881,00	99616774	8.601,00	dU/dt 177	Sin. 180
90.00	177	CUE 3x380-500V 90kW	99616725	7.791,00	99616775	9.739,00	dU/dt 177	Sin. 180

# ANEXO 9: Eficiencia energética, costos energéticos y emisiones de CO<sub>2</sub> - Caso Actual del Fundo agrícola

Anexo 9.1: Parámetros de diseño agronómico

Descripción	Unidad	Valores
Área de Proyecto	ha	11.46
Cultivo		Varios (maíz, tubérculos, paprika, etc.)
Separación Plantas	m	0.40
Separación Hileras de Plantas	m	0.20
<b>LÁMINA DE RIEGO A RESPONDER</b>		
Evapotranspiración - Eto	mm/día	4.17
Coefficiente Cultivo - Kc		1.00
Evapotranspiración Cultivo - Etc	mm/día	4.17
Precipitación Efectiva	mm/día	0.00
Lámina Neta de Riego	mm/día	4.17
Pérdidas de agua por percolación por textura de suelo	%	3%
Requerimiento de riego por días	%	14%
Coefficiente de uniformidad por gotero-CU	%	90%
Eficiencia aplicación de riego	%	77%
Lámina Bruta a Responder	mm/día	3.42
<b>CARACTERÍSTICAS SUELO</b>		
Tipo de Suelo (Según Anexos de suelos)		Francos Arenosos
Densidad aparente	gr/cm <sup>3</sup>	1.32
Capacidad de Campo (CC)	%	13.3
Punto de Marchitez (PMP)	%	3.74
Profundidad de raíz	cm	30
% Aglutamiento	%	30%
Uso total de riego de almacenamiento suelo y cultivo	mm	23.4
Lámina Neta de Riego	mm/día	4.17
Frecuencia de riego máxima	días	3.00
Superficie mojada	%	30%
Frecuencia de riego óptima para goteros	días	1.00
<b>CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS</b>		
Cultivo		Varios (maíz, tubérculos, paprika, etc.)
Superficie ocupada por planta	m <sup>2</sup>	0.09
Caudal del gotero	l/h	1.00
Diámetro de humedecimiento emisor	m	0.33
Sobras entre emisoras	%	40.00%
Separación máxima entre emisoras	m	0.33
Área neta mojada por emisor	m <sup>2</sup>	0.37
Porcentaje de superficie mojada	%	30%
N° Hileras de emisoras colocadas por m <sup>2</sup>	N°/m <sup>2</sup>	1.36
N° Laterales / Hileras de cultivo	N°	1.00
Separación de hileras de emisoras por hilera de cultivo-S1	m	0.30
Separación de emisoras colocadas-S2	m	0.92
Separación entre emisoras colocadas-S2	m	Modificadas por acción
N° Emisoras corregidas por m <sup>2</sup> -S2	N°	0.67
Porcentaje superficie mojada corregida	%	113%
Frecuencia adaptada en sistema de riego por goteros	días	1.00
Dosis Folia de Riego	mm	3.42
Velocidad del emisor	litros/emisor	1.73
Tiempo de riego calculado	horas	1.03
Tiempo total riego por día	horas	9.72
N° Turnos	N°	9.00
Área de Riego por turno	ha	2.30
Capacidad máxima del sistema por turno	l/s	34.79
<b>CARACTERÍSTICAS DEL EMISOR SELECCIONADO</b>		
Línea de Riego		Manguera con gotero
Diámetro	ø	PE - 16.50 mm
Elong	cm	13.41
Peso de sección de manguera	mm	0.30
Caudal del gotero	l/h	1.00
Coefficiente de descarga	k	0.565
Exponente del emisor	c	0.45
Presión media nominal de trabajo	m z.a	10.00
Coefficiente de uniformidad-Cu	%	90%
Máxima variación de caudales de operación para un 10% variación caudal	m z.a	1.09
Separación emisor gotero	m	0.40
Separación emisor lateral	m	0.20
N° Laterales por hilera de cultivo	N° Laterales	1.00
Precipitación hileras del sistema (pgh)	mm/ha	5.00
Precipitación hileras del sistema (pgh)	m <sup>3</sup> /ha/ha	50.00
Precipitación hileras del sistema (pgh)	l/s/ha	1.529

Los datos para obtener la eficiencia hídrica se encuentran en el siguiente cuadro que fueron tomados del expediente técnico y parámetros de diseño del Fundo agrícola, los valores variaron al tener diferentes áreas y cultivos.

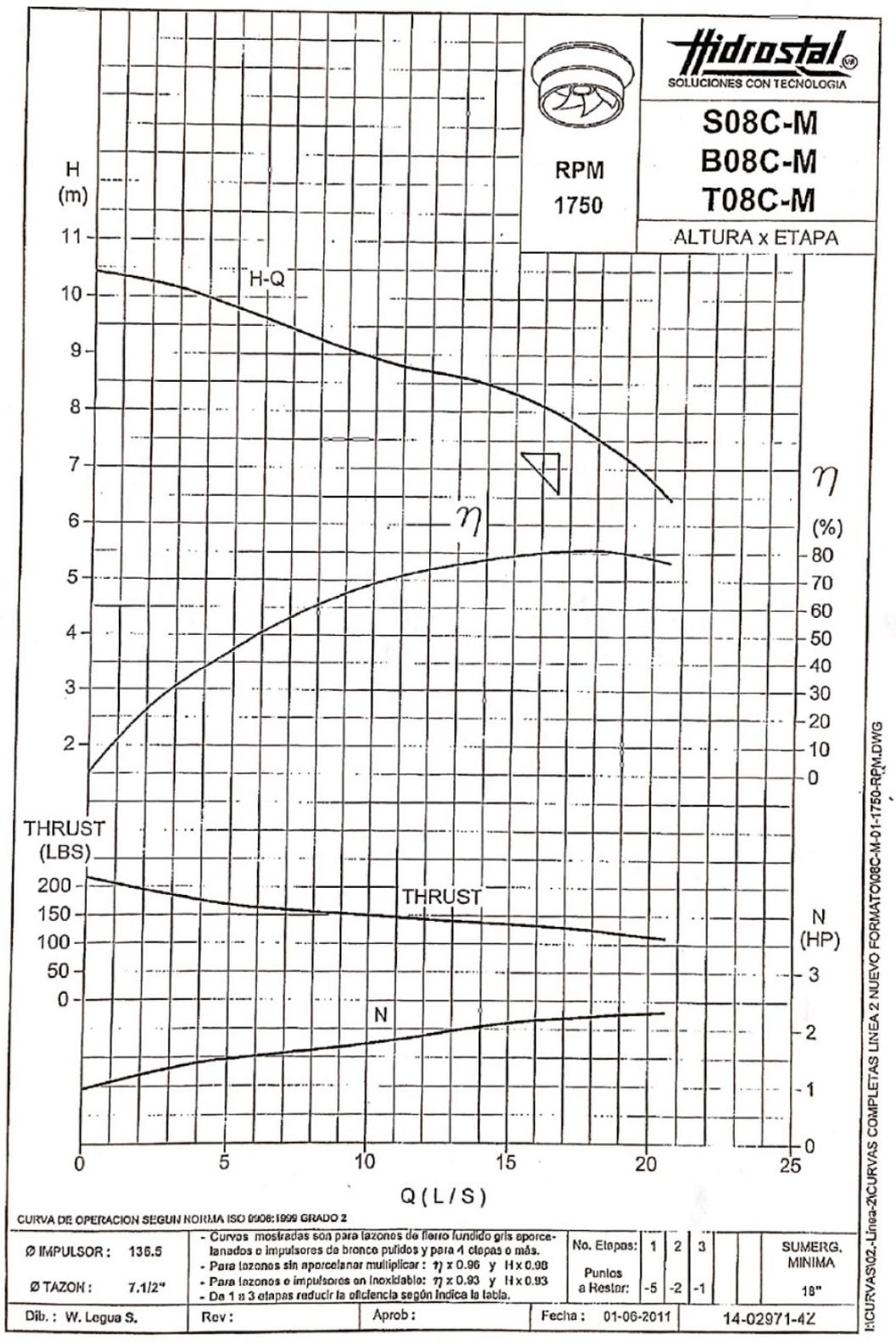
**Anexo 9.2:** Parámetros de eficiencia hídrica para el Fundo agrícola actual

Descripción	Unidades	Valores
Área	ha	22.46
Cultivo	-	maíz
Coefficiente de uniformidad-Cu	-	0.90
Requerimiento de lavado-K=LR	-	0.14
Eficiencia de riego	%	0.77

El coeficiente de uniformidad tuvo un valor de 90 % porque usaron un gotero no autocompensado y la eficiencia de riego fue de 77 % debido al requerimiento de lavado del maíz que es de un 14 % lo que representa un aproximado de 1.8 de mmhos/cm que es un cultivo moderadamente sensible a las sales.

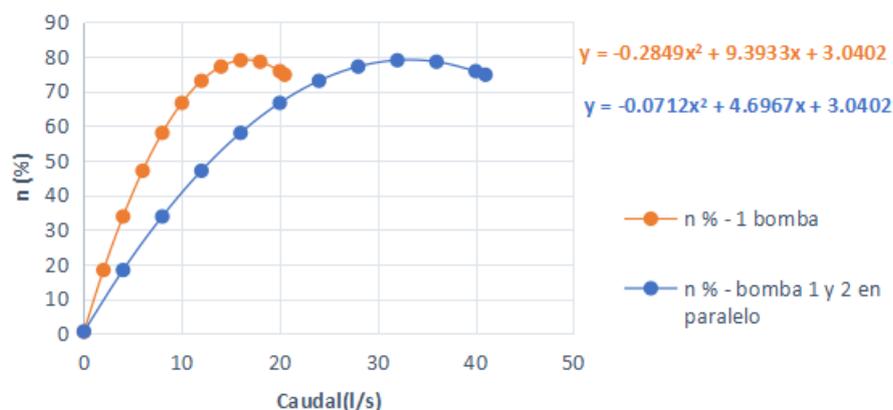
Se obtuvo la marca de la bomba (Hidrostral) y la configuración de la bomba (paralelo usando 2 bombas), con la finalidad de obtener los costos energéticos por estrangulación para los nueve turnos de riego de este escenario se graficaron las curvas características de la bomba en Excel y las curvas en configuración en paralelo.

**Anexo 9.3:** Ficha técnica de la bomba de Hidrostral

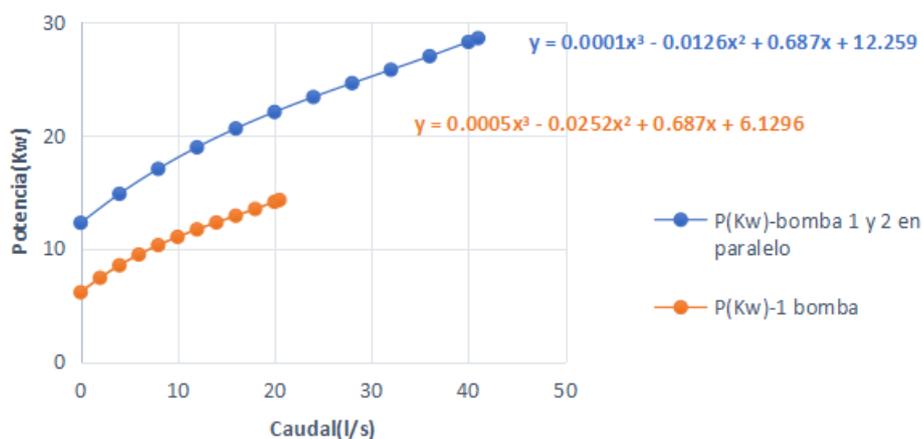


### Anexo 9.4: Curvas de ADT, eficiencia y potencia

**CURVA DE EFICICENCIA - BOMBA 1 ,BOMBA 1Y 2EN PARALELO**



**CURVA DE POTENCIA-BOMBA 1,BOMBA 1 Y 2 EN PARALELO**



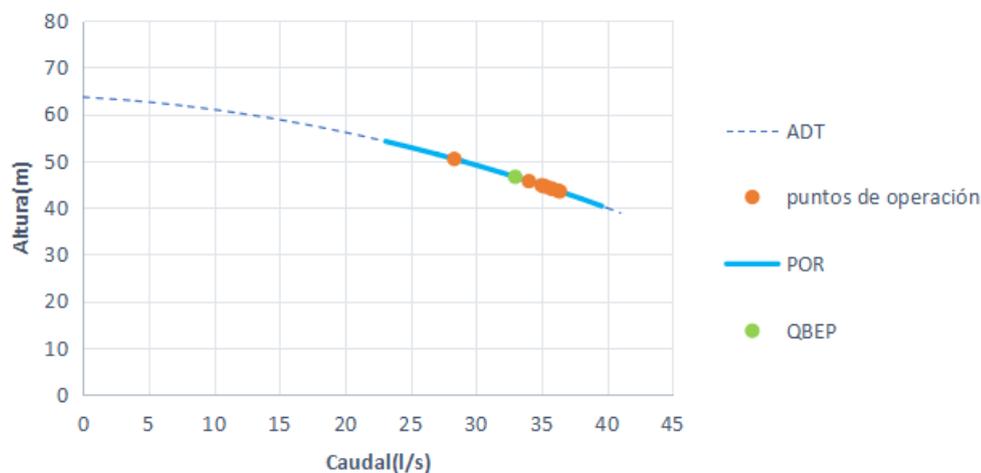
### Anexo 9.5: Puntos de operación del Fundo agrícola actual

Turno	Q(l/s)	ADT(m)	Área (Ha)	%Área
I	34.03	40.79	2.45	10.91
II	35.83	38.67	2.58	11.49
III	36.39	37.99	2.62	11.67
IV	35.14	39.48	2.53	11.26
V	35.69	38.83	2.57	11.44
VI	35.28	39.31	2.54	11.31
VII	35.00	39.64	2.52	11.22
VIII	36.25	38.16	2.61	11.62
IX	28.33	46.92	2.04	9.08
Área total (ha)			22.46	100

Los puntos de operación están dentro de la POR lo que asegura eficiencias altas.

**Anexo 9.6:** Región de operación permisible para los puntos de operación

**PUNTOS DE OPERACIÓN EN LA POR**



**Anexo 9.7:** Costos energéticos

Descripción	Unidades	Valores
Área	ha	22.46
Cultivo	-	maíz
Coefficiente de uniformidad-Cu	-	0.90
Requerimiento de lavado-K=LR	-	0.14
Eficiencia de riego	%	0.77

La eficiencia energética para el caso actual del Fundo agrícola promedio fue de 72.71 % con una eficiencia de motor de 91 %

**Anexo 9.8:** Eficiencia energética

Turno	Eficiencia bomba (%)	Eficiencia motor (%)	Eficiencia energética (%)	Promedio (%)
I	80.42	91	73.18	72.71
II	79.92	91	72.72	
III	79.67	91	72.5	
IV	80.16	91	72.95	
V	79.97	91	72.78	
VI	80.12	91	72.91	
VII	80.2	91	72.99	
VIII	79.73	91	72.56	
IX	78.95	91	71.85	

**Anexo 9.9:** Energía anual por turnos

Turno	Energía anual kWh	Potencia de la red kW	Horas operación anual hr
I	5822.34	20.81	279.79
II	5946.9	21.25	279.83
III	5985.46	21.39	279.8
IV	5898.3	21.08	279.8
V	5937.32	21.22	279.84
VI	5907.78	21.12	279.79
VII	5888.85	21.05	279.81
VIII	5975.78	21.36	279.81
IX	5452.26	19.48	279.84

Las emisiones de  $CO_2$  para el caso actual del Fundo agrícola fueron de 32.48 Tn de  $CO_2$ .

**Anexo 9.10:** Emisiones de  $CO_2$  totales

Parámetros	Unidades	Valores
Energía anual	KWh	52815
Factor de energía eléctrica	kg $CO_2$ /kWh	0.615
Emisiones de $CO_2$	kg $CO_2$	32481.22