



Título del Trabajo Fin de Máster:

***PROCEDIMIENTO PARA LA  
SELECCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE  
REGULACIÓN MÁS ADECUADA  
DESDE EL PUNTO DE VISTA  
ENERGÉTICO EN INSTALACIONES  
CON GRUPOS DE BOMBEO.  
APLICACIÓN A UNA RED DE RIEGO***

Intensificación:

***HIDRÁULICA URBANA***

Autor:

***PEDRO JESÚS GÓMEZ PAJARES***

Director/es:

***DR. JORGE GARCÍA-SERRA GARCÍA***

***DR. JAVIER SORIANO OLIVARES***

Fecha: SEPTIEMBRE, 2013





Título del Trabajo Fin de Máster:

**PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE REGULACIÓN MÁS ADECUADA DESDE EL PUNTO DE VISTA ENERGÉTICO EN INSTALACIONES CON GRUPOS DE BOMBEO. APLICACIÓN A UNA RED DE RIEGO.**

Autor: **PEDRO JESÚS GÓMEZ PAJARES**

Tipo	A <input checked="" type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	DR. JORGE GARCÍA-SERRA GARCÍA	Fecha de Lectura	SEPTIEMBRE 2013
Codirector	DR. JAVIER SORIANO OLIVARES		

**Resumen:**

**El objetivo principal del presente estudio es establecer una metodología para optimizar la regulación en estaciones de bombeo, y diseñar el sistema de regulación más adecuado para una determinada instalación. Se pretende con ello mejorar el comportamiento de los grupos de presión durante su operación, para lograr que éstos funcionen en cada momento en una zona óptima desde el punto de vista energético.**

**La primera fase se centra en la selección de grupos de bombeo, a partir de la visualización de las zonas de operación más eficientes de las bombas y de las exigencias propias de la instalación, definidas a partir de la curva de consigna. Para ello, se creará un modelo matemático que represente gráficamente en el plano H-Q la curva de las bombas y la Curva de Consigna con las zonas de funcionamiento aceptable de los equipos de bombeo, para diferentes opciones de regulación (nº Bombas, Velocidad máxima, velocidad mínima, rendimiento mínimo).**

**En una segunda fase, y definidas diferentes estrategias de regulación, se persigue encontrar aquella que mejor comportamiento presenta, desde el punto de vista energético, para un escenario de consumos dado. Para ello, el modelo hidráulico resolverá, para las condiciones fijadas, el coste asociado a cada sistema de regulación.**

*Todo ello permitirá elegir un procedimiento general para la selección de grupos de bombeo así como la estrategia de regulación más adecuada dadas las exigencias hidráulicas de la instalación. Asimismo, se aplicará el procedimiento de regulación propuesto para mejorar la eficiencia del funcionamiento actual de una red de riego.*

**Resum:**

*L'objectiu principal del present estudi es establir una metodologia per a optimitzar la regulació en estacions de bombeig, y dissenyar el sistema de regulació mes adequat per a una determinada instal·lació. Es pretén amb això millorar el comportament dels grups de pressió durant la seua operació, per a aconseguir que funcionen en cada moment en una zona òptima des del punt de vista energètic.*

*La primera fase es centra en la selecció de grups de bombeig a partir de la visualització de les zones d'operació més eficients de les bombes y de les exigències pròpies de la instal·lació, definides a partir de la corba de consigna. Per això, es crearà un model matemàtic que represente gràficament en el pla H-Q la corba de les bombes i la corba de consigna amb les zones de funcionament acceptable dels equips de bombeig, per a diferents opcions de regulació (nombre de bombes, velocitat màxima i mínima, rendiment mínim, etc.).*

*En una segona fase, i definides diferents estratègies de regulació, es persegueix trobar aquella que millor comportament presenta, des del punt de vista energètic, per a un escenari de consums donat. Per a això, el model hidràulic resoldrà, per a les condicions fixades, el cost associat a cada sistema de regulació. Tot això permetrà triar un procediment general per a la selecció de grups de bombeig així com l'estratègia de regulació més adequada donades les exigències hidràuliques de la instal·lació. Així mateix, s'aplicarà el procediment de regulació proposat per a millorar l'eficiència del funcionament actual d'una xarxa de reg.*

**Abstract:**

*The main goal of this study is to establish a methodology to optimize regulation in pump stations and to design the most suitable control system for a specific installation. The aim is to improve pump station behavior during operation, so as to guarantee that pumps work, from an energy standpoint, as close as possible to their optimal performance points.*

*The first stage is focused on pump selection, depending on the most efficient working areas for a specific working group of pumps and the system's requirements. To achieve this, a mathematical model will be built to graphically represent, in the H-F plane, the pump's curves and the required curve of the system, along with the acceptable operating areas of the pumping equipment for different regulation options (number of pumps, maximum and minimum speed, etc.).*

*Once the different regulation strategies have been defined, the second stage consists in determining which is the best strategy for a given scenario from an energy consumption point of view. To do so, the hydraulic model will solve, for the given conditions, the cost associated to each regulation system.*

*This will allow establishing a general procedure for pump selection and the most appropriate regulation strategy for any given hydraulic requirements. The proposed procedure will also be applied to improve the current efficiency of an irrigation network.*

**Palabras clave:**

*Estaciones de bombeo, selección de bombas, sistema de regulación, red de riego, rendimiento, eficiencia energética, optimización energética, curva de consigna, variador de frecuencia.*

**Paraules Claus:**

**Estació de bombeig, selecció de bombes, sistema de regulació, xarxa de reg, rendiment, eficiència energètica, optimització energètica, corba de consigna,, variador de freqüència.**

**Key words:**

**Pump station, pump selection, regulation strategies, irrigation network, energy consumption, efficiency, frequency converter.**

*Dedicado a mi familia*



## **AGRADECIMIENTOS**

A Jorge García-Serra por el interés mostrado en dirigir este Trabajo Final de Máster, por sacar ratos para guiarme aun estando apretado de tiempo. Realmente es un placer recibir tus consejos y explicaciones y notar el empeño que pones en “transmitir conocimiento”. Lo consigues. Sinceramente gracias.

A Javier Soriano por su plena disposición, inestimable ayuda y especialmente por sus continuados ánimos.

Al profesorado del Máster por hacer un arte de su profesión.

A mi familia por estar ahí.

A mis Padres por su amor y su dedicación, por enseñarme a valorar la Cultura y por educarme en decisión y pensamiento libre.

A mi esposa, por quererme, apoyarme y aguantarme.



## CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN .....	17
1.1	INTRODUCCIÓN .....	19
1.2	OBJETIVOS .....	20
1.3	ESTRUCTURA DEL TRABAJO .....	20
1.4	ALGUNOS CONCEPTOS TÉCNICOS DE IMPORTANCIA .....	21
1.4.1	CURVA MOTRIZ .....	21
1.4.2	CURVA RESISTENTE .....	22
1.4.3	PUNTO DE FUNCIONAMIENTO .....	22
1.4.4	CURVA DE CONSIGNA .....	23
1.4.5	IMPLICACIONES ENERGÉTICAS .....	24
1.4.6	BOMBAS DE VELOCIDAD VARIABLE .....	27
1.4.7	COLINAS DE ISORRENDIMIENTO .....	28
1.4.8	RENDIMIENTO DE LA BOMBA .....	30
1.4.9	PENALIZACIÓN DEL RENDIMIENTO MEDIANTE SARBU-BORZA .....	31
1.4.10	ZONA ÚTIL DE UNA BOMBA DE VELOCIDAD FIJA .....	32
1.4.11	ZONA ÚTIL DE UNA BOMBA DE VELOCIDAD VARIABLE .....	33
1.4.12	ASOCIACIÓN DE BOMBAS EN PARALELO .....	34
1.4.13	REGULACIÓN ESCALONADA Y COMPARTIDA .....	36
1.4.14	ZONA DE COBERTURA DE LA CURVA DE CONSIGNA .....	37
1.4.15	RECUBRIMIENTO .....	37
1.5	ESTADO DEL ARTE .....	39
2.	MODELO HIDRÁULICO DE SIMULACIÓN Y VISUALIZACIÓN .....	41
2.1	INTRODUCCIÓN .....	43
2.2	CARACTERIZACIÓN DE LAS EXIGENCIAS DE OPERACIÓN .....	43
2.2.1	NÚMERO DE BOMBAS .....	43
2.2.2	CURVA MOTRIZ .....	44

2.2.3	PARÁMETRO “ $\alpha$ ” MÍNIMO Y MÁXIMO.....	44
2.2.4	CURVA DE RENDIMIENTO.....	45
2.2.5	RENDIMIENTO MÍNIMO .....	45
2.2.6	PENALIZACIÓN DEL RENDIMIENTO MEDIANTE SARBU-BORZA .....	45
2.2.7	PARÁBOLAS DE ISORRENDIMIENTO.....	46
2.2.8	RESOLUCIÓN DE UNA ZONA ÚTIL.....	46
2.2.9	COMPOSICIÓN DEL MAPA DE ZONAS ÚTILES .....	49
2.2.10	CAUDALES MÍNIMO Y MÁXIMO .....	49
2.2.11	CURVA DE CONSIGNA.....	50
2.2.12	IMPORTANCIA DE LA VISUALIZACIÓN DEL ESCENARIO.....	51
2.2.13	INTERSECCIÓN ENTRE ZONAS ÚTILES Y CURVA DE CONSIGNA.....	55
2.3	INDICADORES DE COBERTURA DE LA CURVA DE CONSIGNA.....	55
2.3.1	COBERTURA.....	55
2.3.2	RECUBRIMIENTO ACUMULADO .....	56
3.	MODELO ENERGÉTICO ECONÓMICO .....	59
3.1	INTRODUCCIÓN .....	61
3.2	TARIFAS ELÉCTRICAS .....	61
3.2.1	CONCEPTOS PAGADOS EN UNA FACTURA ELÉCTRICA.....	61
3.2.2	TIPOS DE CONTRATO.....	62
3.2.3	LEGISLACIÓN APLICABLE .....	63
3.3	CARACTERIZACIÓN DE LAS EXIGENCIAS DE SIMULACIÓN.....	64
3.3.1	CALENDARIO ANUAL IMPLEMENTADO .....	64
3.3.2	INPUTS DEL MODELO .....	64
3.3.3	CÁLCULO DEL RENDIMIENTO BVF Y DEL RENDIMIENTO BVV .....	65
3.3.4	MODIFICACIÓN DEL RENDIMIENTO POR SARBU-BORZA .....	66
3.3.5	CÁLCULO DE LA POTENCIA DE BVF Y LA POTENCIA DE BVV .....	66
3.3.6	CÁLCULO DE LA ENERGÍA .....	67
3.3.7	CÁLCULO DEL COSTE POR ENERGÍA .....	67

---

3.3.8	CÁLCULO DEL COSTE POR POTENCIA .....	67
3.3.9	OTROS COSTES .....	68
3.4	RESULTADO FINAL DEL ESCENARIO.....	68
3.5	RESUMEN DE RESULTADOS.....	69
4.	APLICACIÓN DE LOS MODELOS A UNA RED DE RIEGO.....	71
4.1	INTRODUCCIÓN .....	73
4.2	DESCRIPCIÓN DE LA RED DE RIEGO.....	73
4.2.1	ENTORNO GEOGRÁFICO.....	73
4.2.2	ABASTECIMIENTO DE LA RED .....	73
4.2.3	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL ÁREA DOTADA DE RIEGO .....	74
4.2.4	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA RED DE RIEGO.....	74
4.3	REGISTRO DE CAUDALES .....	77
4.4	CURVA DE CONSIGNA.....	77
4.5	ELECCIÓN DE ESCENARIOS .....	79
4.6	SIMULACIÓN DE LOS ESCENARIOS ELEGIDOS .....	80
4.6.1	ESCENARIO 3V+5F .....	80
4.6.2	ESCENARIO 2V+6F .....	82
4.6.3	ESCENARIO 1V+7F .....	84
4.7	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	86
5.	CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.....	89
5.1	CONCLUSIONES .....	91
5.1.1	SÍNTESIS DEL TRABAJO .....	91
5.1.2	CONCLUSIONES .....	92
5.2	DESARROLLOS FUTUROS.....	92
6.	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS .....	95
1.	ANEXO. VISUALIZACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN DEL MAPA DE ZONAS ÚTILES.....	99
A.	CONSTRUCCIÓN DEL MAPA DE ZONAS ÚTILES. ESCENARIO 3V+5F.....	101
B.	CONSTRUCCIÓN DEL MAPA DE ZONAS ÚTILES. ESCENARIO 2V+6F.....	111



## FIGURAS

FIGURA 1: CURVA MOTRIZ .....	21
FIGURA 2: CURVA RESISTENTE .....	22
FIGURA 3: PUNTO DE FUNCIONAMIENTO .....	23
FIGURA 4: CURVA DE CONSIGNA .....	24
FIGURA 5: "PF" REAL VS "PF" TEÓRICO DE CURVA DE CONSIGNA.....	25
FIGURA 6: PEAJES DE POTENCIA .....	26
FIGURA 7: BOMBA DE VELOCIDAD VARIABLE A DIFERENTES VELOCIDADES. PUNTOS HOMÓLOGOS .....	28
FIGURA 8: COLINAS DE ISORRENDIMIENTO .....	29
FIGURA 9: COLINAS DE ISORRENDIMIENTO. PF. CON RENDIMIENTO MENOR AL ESPERADO.....	30
FIGURA 10: RENDIMIENTO DE LA BOMBA .....	31
FIGURA 11: ZONA ÚTIL DE UNA BOMBA DE VELOCIDAD FIJA .....	33
FIGURA 12: ZONA ÚTIL DE UNA BOMBA DE VELOCIDAD VARIABLE .....	34
FIGURA 13: CURVA MOTRIZ DE 2xBVF EN PARALELO .....	35
FIGURA 14: ZONA DE RECUBRIMIENTO EN BOMBAS DE CARACTERÍSTICA PLANA.....	37
FIGURA 15: ZONA SIN CUBRIR EN BOMBAS CON CARACTERÍSTICA VERTICAL .....	38
FIGURA 16: ZONA ÚTIL 1xBVV A VELOCIDAD DE GIRO MÁXIMA = NOMINAL.....	47
FIGURA 17: ZONA ÚTIL 2xBVV A VELOCIDAD DE GIRO MÁXIMA = NOMINAL.....	48
FIGURA 18: ZONA ÚTIL 2xBVV A VELOCIDAD DE GIRO MÁXIMA > NOMINAL .....	48
FIGURA 19: ZONA ÚTIL 1XBVF + 2xBVV A VELOCIDAD DE GIRO MÁXIMA = NOMINAL .....	49
FIGURA 20: CURVA DE CONSIGNA SUPERPUESTA SOBRE EL APILAMIENTO DE ZONAS ÚTILES. "A" .....	51
FIGURA 21: CURVA DE CONSIGNA SUPERPUESTA SOBRE EL APILAMIENTO DE ZONAS ÚTILES. "B" .....	52
FIGURA 22: ESCENARIO NO ADECUADO 1.....	52
FIGURA 23: ESCENARIO NO ADECUADO 1 CON SOBREVOLUCIDAD .....	53
FIGURA 24: ESCENARIO NO ADECUADO 2.....	54
FIGURA 25: ESCENARIO NO ADECUADO 2 CON SOBREVOLUCIDAD .....	54
FIGURA 26: ZONA DE RECUBRIMIENTO.....	56
FIGURA 27: SOLAPE ACUMULADO. ....	57
FIGURA 28: ESTRUCTURA DE PAGO EN TARIFA REGULADA. ....	62
FIGURA 29: ESTRUCTURA DE PAGO EN MERCADO LIBERALIZADO .....	63
FIGURA 30: CUENCA HIDROGRÁFICA DEL GUADIANA .....	73
FIGURA 31: EMBALSE DE LA SERENA Y DEL ZUJAR.....	74
FIGURA 32: ABASTECIMIENTO ELÉCTRICO .....	74

<i>FIGURA 33: RED DE TUBERÍAS.....</i>	<i>75</i>
<i>FIGURA 34: RED REPRESENTADA MEDIANTE EPANET SOBRE EL SECTOR HIDRÁULICO .....</i>	<i>75</i>
<i>FIGURA 35: EQUIPO DE BOMBEO INSTALADO .....</i>	<i>76</i>
<i>FIGURA 36: CURVAS DE FABRICANTE DE LA BOMBA MODELO 10LNH/LNCH-18.....</i>	<i>76</i>
<i>FIGURA 37: CURVA DE CONSIGNA PARA UN SISTEMA DE RIEGO A LA DEMANDA .....</i>	<i>78</i>
<i>FIGURA 38: CURVA DE CONSIGNA DE LA RED DE RIEGO.....</i>	<i>79</i>
<i>FIGURA 39: MAPA DE ZONAS ÚTILES PARA ESCENARIO 3V+5F.....</i>	<i>81</i>
<i>FIGURA 40: MAPA DE ZONAS ÚTILES PARA ESCENARIO 2V+6F.....</i>	<i>83</i>
<i>FIGURA 41: MAPA DE ZONAS ÚTILES PARA ESCENARIO 1V+7F.....</i>	<i>85</i>
<i>FIGURA 42: ESCENARIO 3V+5F. VISUALIZACIÓN DE LA PRIMERA ZONA ÚTIL (1xBVV).....</i>	<i>102</i>
<i>FIGURA 43: ESCENARIO 3V+5F. APILAMIENTO DE LA SEGUNDA ZONA ÚTIL .....</i>	<i>103</i>
<i>FIGURA 44: ESCENARIO 3V+5F. APILAMIENTO DE LA TERCERA ZONA ÚTIL.....</i>	<i>104</i>
<i>FIGURA 45: ESCENARIO 3V+5F. APILAMIENTO DE LA CUARTA ZONA ÚTIL.....</i>	<i>105</i>
<i>FIGURA 46: ESCENARIO 3V+5F. APILAMIENTO DE LA QUINTA ZONA ÚTIL.....</i>	<i>106</i>
<i>FIGURA 47: ESCENARIO 3V+5F. APILAMIENTO DE LA SEXTA ZONA ÚTIL .....</i>	<i>107</i>
<i>FIGURA 48: ESCENARIO 3V+5F. APILAMIENTO DE LA SÉPTIMA ZONA ÚTIL.....</i>	<i>108</i>
<i>FIGURA 49: ESCENARIO 3V+5F. APILAMIENTO DE LA OCTAVA ZONA ÚTIL .....</i>	<i>109</i>
<i>FIGURA 50: ESCENARIO 3V+5F. VISTA COMPLETA.....</i>	<i>110</i>
<i>FIGURA 51: ESCENARIO 2V+6F. VISUALIZACIÓN DE LA PRIMERA ZONA ÚTIL .....</i>	<i>111</i>
<i>FIGURA 52: ESCENARIO 2V+6F. APILAMIENTO DE LA SEGUNDA ZONA ÚTIL .....</i>	<i>112</i>
<i>FIGURA 53: ESCENARIO 2V+6F. APILAMIENTO DE LA TERCERA ZONA ÚTIL.....</i>	<i>113</i>
<i>FIGURA 54: ESCENARIO 2V+6F. APILAMIENTO DE LA CUARTA ZONA ÚTIL.....</i>	<i>114</i>
<i>FIGURA 55: ESCENARIO 2V+6F. APILAMIENTO DE LA QUINTA ZONA ÚTIL.....</i>	<i>115</i>
<i>FIGURA 56: ESCENARIO 2V+6F. APILAMIENTO DE LA SEXTA ZONA ÚTIL .....</i>	<i>116</i>
<i>FIGURA 57: ESCENARIO 2V+6F. APILAMIENTO DE LA SÉPTIMA ZONA ÚTIL.....</i>	<i>117</i>
<i>FIGURA 58: ESCENARIO 2V+6F. APILAMIENTO DE LA OCTAVA ZONA ÚTIL .....</i>	<i>118</i>
<i>FIGURA 59: VISTA COMPLETA DEL ESCENARIO 2V+6F.....</i>	<i>119</i>
<i>FIGURA 60: ESCENARIO 1V+7F. VISUALIZACIÓN DE LA PRIMERA ZONA ÚTIL .....</i>	<i>120</i>
<i>FIGURA 61: ESCENARIO 1V+7F. APILAMIENTO DE LA SEGUNDA ZONA ÚTIL .....</i>	<i>121</i>
<i>FIGURA 62: ESCENARIO 1V+7F. APILAMIENTO DE LA TERCERA ZONA ÚTIL.....</i>	<i>122</i>
<i>FIGURA 63: ESCENARIO 1V+7F. APILAMIENTO DE LA CUARTA ZONA ÚTIL.....</i>	<i>123</i>
<i>FIGURA 64: ESCENARIO 1V+7F. APILAMIENTO DE LA QUINTA ZONA ÚTIL.....</i>	<i>124</i>
<i>FIGURA 65: ESCENARIO 1V+7F. APILAMIENTO DE LA SEXTA ZONA ÚTIL .....</i>	<i>125</i>
<i>FIGURA 66: ESCENARIO 1V+7F. APILAMIENTO DE LA SÉPTIMA ZONA ÚTIL.....</i>	<i>126</i>

---

<i>FIGURA 67: ESCENARIO 1V+7F. APILAMIENTO DE LA OCTAVA ZONA ÚTIL .....</i>	<i>127</i>
<i>FIGURA 68: ESCENARIO 1V+7F. VISTA COMPLETA DEL ESCENARIO.....</i>	<i>128</i>

## **TABLAS**

<i>TABLA 1: RESULTADO ECONÓMICO.....</i>	<i>68</i>
<i>TABLA 2: RESUMEN DE RESULTADOS.....</i>	<i>69</i>
<i>TABLA 3: RESULTADO ENERGÉTICO-ECONÓMICO PARA EL ESCENARIO 3V+5F.....</i>	<i>81</i>
<i>TABLA 4: BALANCE MENSUAL DE LA ENERGÍA PARA EL ESCENARIO 3V+5F.....</i>	<i>82</i>
<i>TABLA 5: RESULTADO ENERGÉTICO-ECONÓMICO DEL ESCENARIO 2V+6F.....</i>	<i>83</i>
<i>TABLA 6: BALANCE MENSUAL DE LA ENERGÍA DEL ESCENARIO 2V+6F.....</i>	<i>84</i>
<i>TABLA 7: RESULTADO ENERGÉTICO-ECONÓMICO DEL ESCENARIO 1V+7F.....</i>	<i>85</i>
<i>TABLA 8: BALANCE MENSUAL DE LA ENERGÍA DEL ESCENARIO 1V+7F.....</i>	<i>86</i>
<i>TABLA 9: RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS TRES ESCENARIOS.....</i>	<i>87</i>
<i>TABLA 10: PARTE ANALÍTICA DEL MODELO HIDRÁULICO DE VISUALIZACIÓN.....</i>	<i>101</i>



## ***CAPÍTULO***

---

### ***1. INTRODUCCIÓN***



## 1.1 INTRODUCCIÓN

El bombeo de agua es una acción tan cotidiana como necesaria. Sobra justificar su necesidad, para cualquiera de sus usos, el transporte de agua desde la producción hasta las zonas de consumo tiende a efectuarse, si no es posible por gravedad, mediante esta opción.

Este transporte no está exento de dificultades. Físicamente hablando, el trasiego de agua a presión impone un peaje energético muy importante y, en consecuencia, un impacto económico de la misma magnitud. Siendo así, se hace necesaria una infraestructura hidráulica que resulta difícil de proyectar, ejecutar y mantener para conseguir que el funcionamiento de este sistema hidráulico tenga un rendimiento adecuado. Este rendimiento depende sensiblemente del sistema de regulación implementado.

A lo largo de la historia, las técnicas de bombeo han evolucionado consiguiendo, cada vez, mayores prestaciones y garantías. Los esquemas que se presentan en la actualidad son diversos pero esclavos, en gran medida, de la naturaleza de los consumos que abastecen.

Cuando los consumos son variables, difícilmente predecibles y cuando, tras la evaluación pertinente, el esquema adecuado es el de inyección directa a red, elegir la mejor regulación para la estación de bombeo se vuelve extremadamente complicado. Las variables de decisión de este problema de optimización son muchas, las restricciones complicadas de definir y en muchos casos contrapuestas, etc. En definitiva, la variedad de escenarios posibles y la dificultad de estudio de cada uno de ellos lastran de forma irremediable los procedimientos actuales para encontrar la mejor solución.

Por otro lado, es conocido el problema energético que de forma global existe en la actualidad. Esta situación no hace más que remarcar la necesidad de buscar nuevas formas de abordar el problema de encontrar una regulación óptima.

El presente trabajo propone arrojar luz a esta problemática sin resolver. Expone la formulación de la hidráulica clásica relacionando las expresiones entre sí y agrupándolas formando los eslabones que darán forma a un procedimiento, fundamentalmente de simulación, que sirva de soporte a la decisión del técnico que pretenda proyectar o mejorar el sistema de regulación de un equipo de bombeo dado. Siempre desde el punto de vista del coste energético.

## 1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es crear un procedimiento que ayude a seleccionar la mejor estrategia de regulación de un equipo de bombeo desde el punto de vista energético. Este objetivo, se debe cumplir mediante la consecución de los siguientes hitos:

- Construir un modelo hidráulico de visualización que permita al usuario interactuar, con razonable comodidad, con el escenario implementado. De tal forma que el entorno visual resultado de la simulación permita extraer conclusiones sobre el escenario simulado.
- Encontrar los indicadores adecuados que, sintetizando la información obtenida de la simulación hidráulica, nos permitan realizar comparaciones entre distintos escenarios con el fin de descartar aquellos que no cumplen con las premisas hidráulicas requeridas.
- Construir un modelo energético económico que calcule, dada la serie de caudales demandados, el coste energético de la regulación propuesta para un escenario en un año.

## 1.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El presente trabajo se divide en tres bloques conceptuales:

En el primer bloque, que se corresponde con el Capítulo 1, se comentan los aspectos técnicos que, en mayor o menor medida, se utilizarán en el resto del trabajo. De forma paralela, se introduce la importancia que tiene el sistema de regulación en los equipos de bombeo y la repercusión que su rendimiento tiene respecto al rendimiento global.

El segundo bloque, que se corresponde con los Capítulos 2 y 3, explica la construcción de los modelos de simulación de escenarios. Se incluye la constitución de los mismos, sus fundamentos físicos así como la manera en que se debe proceder con ellos y cómo interpretar sus resultados.

El tercer bloque, que se corresponde con el Capítulo 4, relata el uso de los modelos matemáticos presentados para analizar una red de riego, se plantearán 3 escenarios explicando el desarrollo de cada uno de ellos para acabar comentando los resultados.

Además de los bloques comentados, se exponen las conclusiones extraídas de la realización del trabajo y los posibles desarrollos futuros.

## 1.4 ALGUNOS CONCEPTOS TÉCNICOS DE IMPORTANCIA

Con el fin de facilitar el entendimiento del trabajo realizado, se comentan brevemente los siguientes conceptos hidráulicos.

### 1.4.1 CURVA MOTRIZ

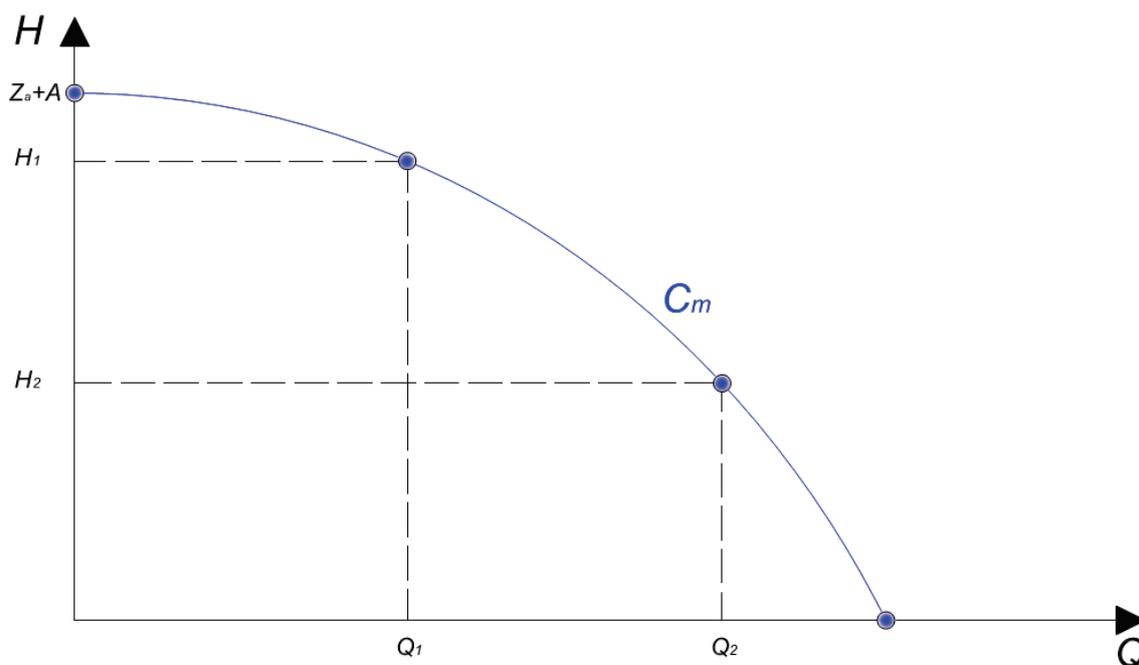
Se puede definir la curva motriz " $C_m$ " como la función " $H = Z_a + f(Q)$ " que expresa la energía por unidad de peso que está disponible en un punto concreto del sistema hidráulico.

El término " $Z_a$ " (altura de aspiración) hace referencia al nivel de energía potencial que posee el fluido antes de ser aspirado por la bomba. El término " $f(Q)$ " hace referencia a la energía que aporta la bomba al fluido y usualmente se parametriza por la siguiente expresión:

$$f(Q) = A + B \cdot Q + C \cdot Q^2$$

Donde el parámetro " $C$ " es, evidentemente, negativo y el parámetro " $A$ " es la ordenada en el origen.

De esta forma, se observa que para caudal nulo, la bomba dará su máxima altura " $Z_a + A$ ". La altura, forzosamente disminuye conforme aumenta el caudal. Es decir, para dos caudales tal que " $Q_2 > Q_1$ " tendremos que sus respectivas alturas cumplirán " $H_2 < H_1$ ". Finalmente, el máximo caudal es el que se obtiene de la ecuación para altura nula.



**FIGURA 1: CURVA MOTRIZ**

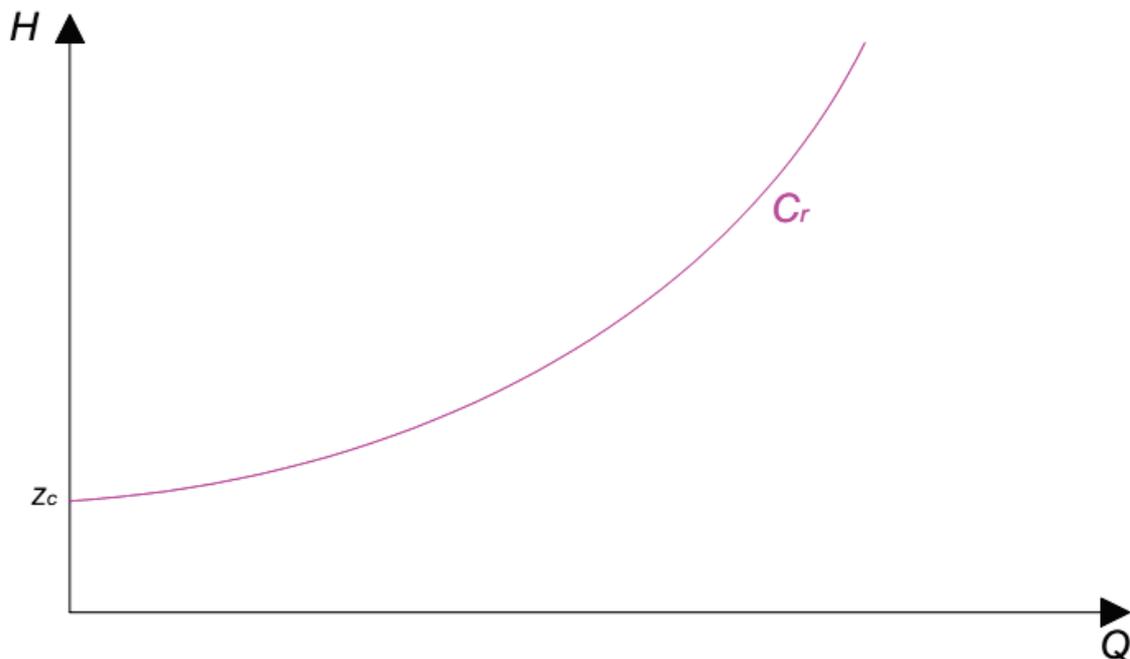
### 1.4.2 CURVA RESISTENTE

Se puede definir la curva resistente “ $C_r$ ” de un sistema hidráulico dado como la función “ $H_r = Z_c + h(Q)$ ” que expresa la energía por unidad de peso requerida para vencer la altura de consumo y las pérdidas de carga del sistema, entregando el agua en el consumo desde un punto determinado de la instalación.

El término “ $Z_c$ ” (altura de consumo) hace referencia al nivel de energía potencial que posee el fluido en el punto de consumo. El término “ $h(Q)$ ” hace referencia a la energía necesaria para vencer las pérdidas de carga del sistema y se puede parametrizar mediante la siguiente expresión:

$$h(Q) = K \cdot Q^2$$

Es la dependencia cuadrática que muestran las pérdidas con el caudal la que hace que se pueda representar gráficamente la altura resistente como la rama creciente de una parábola positiva, donde la ordenada en el origen será la altura de consumo “ $Z_c$ ”.

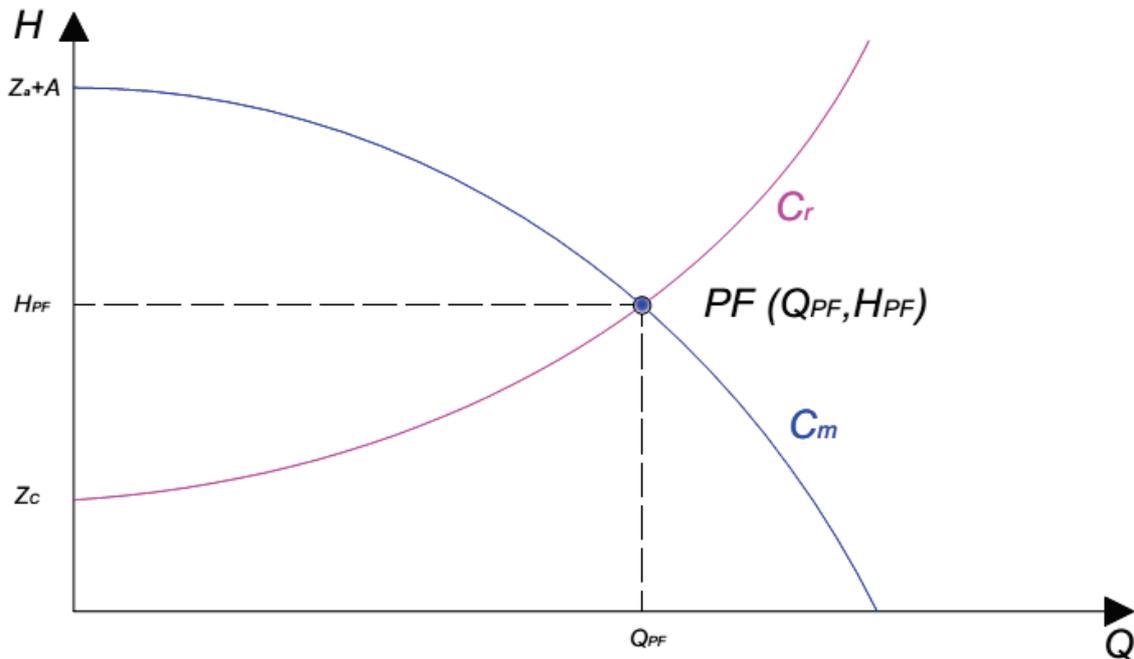


*FIGURA 2: CURVA RESISTENTE*

### 1.4.3 PUNTO DE FUNCIONAMIENTO

Si disponemos en el mismo espacio “ $HQ$ ” la curva resistente que presenta el sistema hidráulico, por una parte, y la Curva Motriz del sistema de bombeo instalado en dicho sistema por otra, es inmediato entender que las coordenadas del punto de intersección de ambas

curvas representan las condiciones en las que va a funcionar este equipo de bombeo en el sistema hidráulico. Se le conoce con el nombre de punto de funcionamiento.



**FIGURA 3: PUNTO DE FUNCIONAMIENTO**

De forma analítica el punto de funcionamiento queda resuelto igualando ambas expresiones, esto es:

$$H_m = H_r = H_{PF}$$

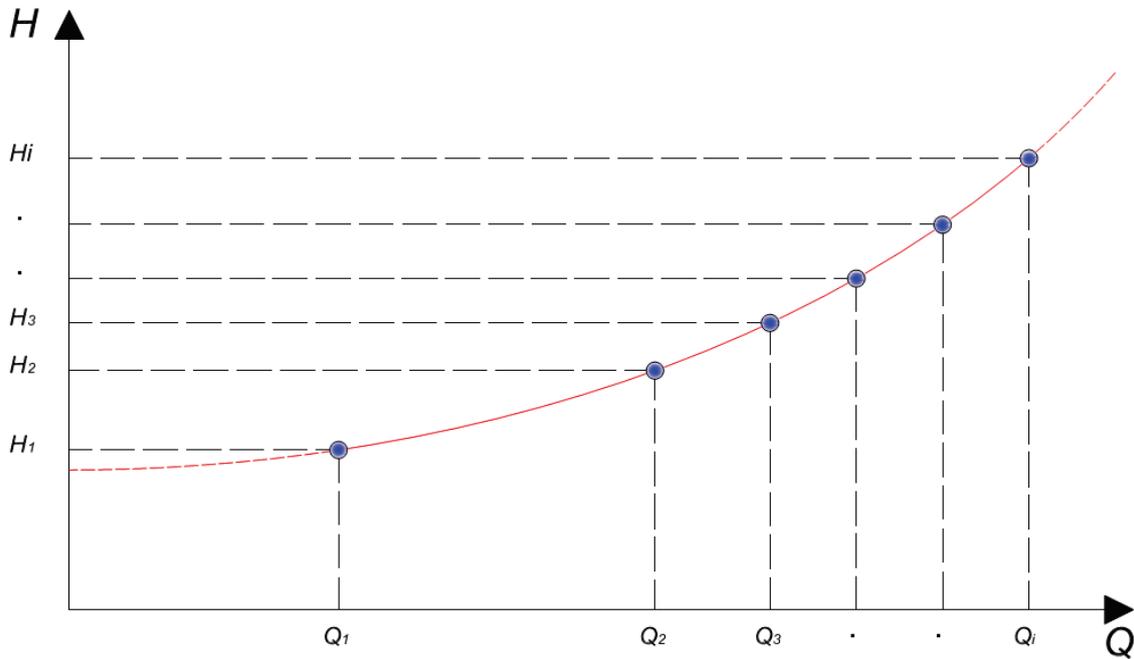
$$Z_a + A + B \cdot Q_{PF} + C \cdot Q_{PF}^2 = Z_c + K \cdot Q_{PF}^2$$

#### 1.4.4 CURVA DE CONSIGNA

Supongamos, por ejemplo, el abastecimiento de una red hidráulica real de un solo consumo. En una situación cualquiera de esta red, con un caudal demandado “ $Q_{D1}$ ”, existirá una altura en cabecera “ $H_{C1}$ ” tal, que minimice la potencia de bombeo necesaria para trasegar dicha agua, en las condiciones requeridas, hasta el punto de consumo. Este valor “ $H_C$ ” es el límite por debajo del cual no logramos suministrar el agua en las condiciones requeridas.

Supongamos la misma red funcionando con otro caudal demandado “ $Q_{D2}$ ” para el cual existirá otra altura en cabecera que minimice la potencia de bombeo necesaria para trasegar dicha agua, en las condiciones requeridas, hasta el punto de consumo.

Si llevamos este proceso al extremo buscando los “ $H_{Ci}$ ” pertenecientes a cada “ $Q_{Di}$ ” posible y representamos cada pareja de valores como coordenadas en el espacio “ $HQ$ ”, obtendremos la curva de consigna de este sistema.



**FIGURA 4: CURVA DE CONSIGNA**

Por tanto, se propone la curva de consigna de un sistema como la función “ $H_c = f(Q_D)$ ” que define la mínima altura de cabecera necesaria para trasegar el agua, en las condiciones requeridas, hasta el punto de consumo, para cualquier valor de caudal demandado.

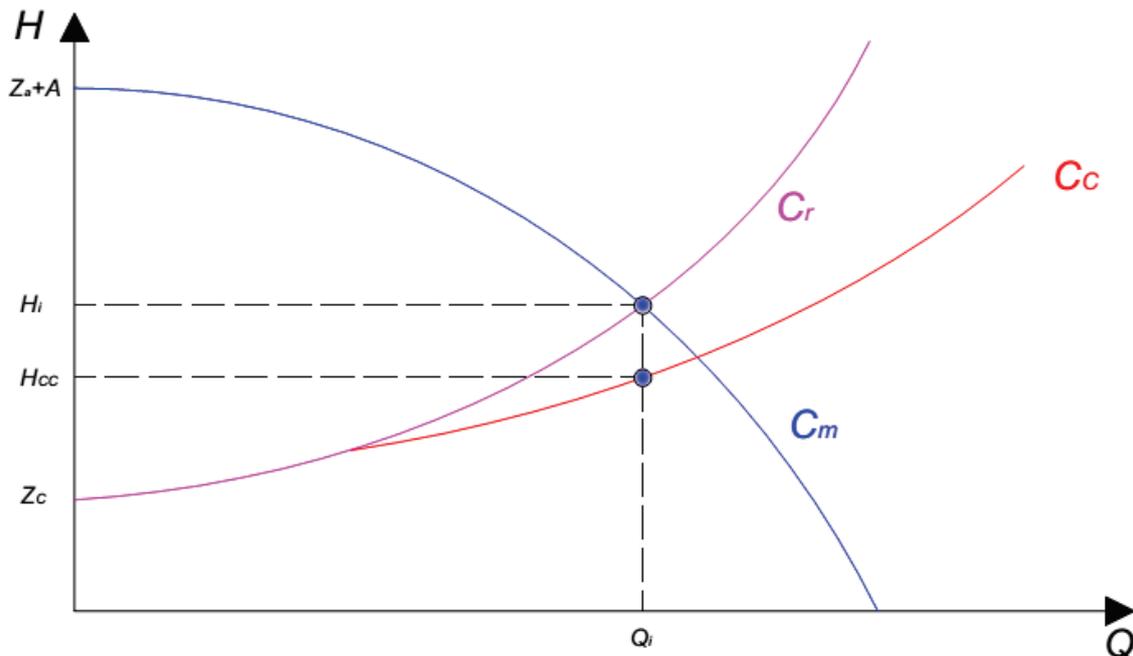
La curva de consigna es una función normalmente asemejable a la rama creciente de una parábola positiva, esta pendiente depende de las pérdidas de carga de la instalación. En el hipotético caso de que la instalación no presentase pérdidas de carga, la curva de consigna se convertiría en una horizontal.

#### 1.4.5 IMPLICACIONES ENERGÉTICAS

Una vez conocida la curva de consigna de un sistema y comprendido su significado se puede, a partir de ella, entender los diferentes escalones de potencia que se suceden en el fenómeno físico que acontece.

De esta forma, la intersección de la curva motriz y la curva resistente, nos muestra el punto de funcionamiento real, mientras que la curva de consigna, en ese mismo caudal, nos define la altura teórica necesaria.

En la FIGURA 5 se aprecia una situación de bombeo cualquiera, en la que para un “ $Q_i$ ” dado, se está suministrando una altura “ $H_i$ ” mayor que la altura mínima necesaria “ $H_{CC}$ ” que nos marca la curva de consigna. Se puede decir que la energía por unidad de peso destinada para cubrir las necesidades de bombeo no es mínima. Se está gastando más energía de la que es teóricamente necesaria. ¿A qué se debe esta incapacidad de minimizar la energía?



**FIGURA 5: "PF" REAL VS "PF" TEÓRICO DE CURVA DE CONSIGNA**

En la FIGURA 6 se representan las potencias “ $P_N$ ”, “ $P_S$ ”, “ $P_A$ ” y “ $P_E$ ”, en función del caudal.

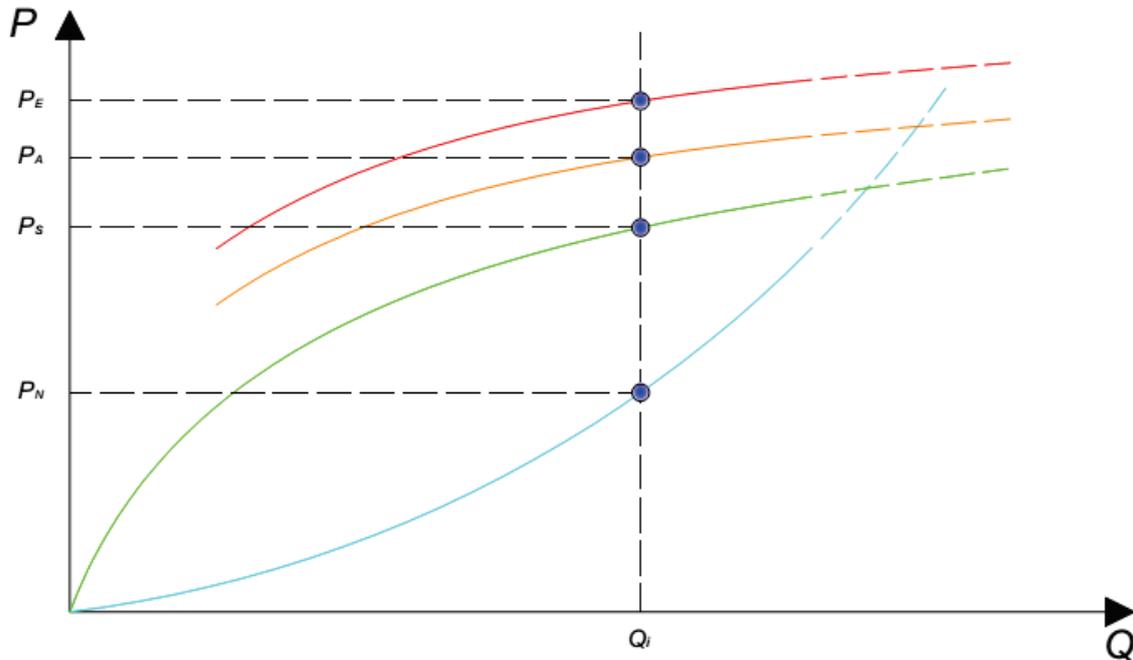
La potencia hidráulica se define como:

$$P = \gamma \cdot Q \cdot H$$

La potencia necesaria “ $P_N$ ” es la que se deriva de las condiciones de caudal y presión expresadas por la curva de consigna. En cambio, la potencia suministrada “ $P_S$ ” utiliza en su formulación la altura real. A la relación entre la potencia necesaria “ $P_N$ ” y la potencia suministrada “ $P_S$ ” se le denomina como rendimiento de regulación, esto es:

$$\eta_{Reg} = \frac{P_N}{P_S}$$

Es evidente que el rendimiento de regulación “ $\eta_{Reg}$ ” es el indicador del funcionamiento del sistema de regulación instalado en un equipo de bombeo. Cuanto mejor sea el sistema de regulación instalado, menos potencia se desperdiciará (ya que se seguirá mejor la curva de consigna) y más cercano a 1 será el indicador.



**FIGURA 6: PEAJES DE POTENCIA**

Por otro lado, la potencia absorbida “ $P_A$ ”, es la que incluye la potencia que se degrada en el equipo de bombeo (pérdidas en bomba). A la relación entre la potencia suministrada “ $P_S$ ” y la potencia absorbida “ $P_A$ ” se le denomina rendimiento de la bomba “ $\eta_B$ ”, es decir:

$$\eta_B = \frac{P_S}{P_A}$$

El rendimiento de la instalación “ $\eta_{Inst}$ ” queda definido como el producto entre el rendimiento de regulación “ $\eta_{Reg}$ ” y el rendimiento de la bomba “ $\eta_B$ ”:

$$\eta_{Inst} = \eta_{Reg} \cdot \eta_B = \frac{P_N}{P_A}$$

Finalmente, la potencia eléctrica “ $P_E$ ” es la que tiene en cuenta la potencia que se pierde en el motor eléctrico. A la relación entre la potencia absorbida “ $P_A$ ” y la potencia eléctrica “ $P_E$ ” se le denomina como rendimiento del motor eléctrico “ $\eta_{ME}$ ”, esto es:

$$\eta_{ME} = \frac{P_A}{P_E}$$

Y el rendimiento global será igual al producto entre el rendimiento de regulación, el rendimiento de la bomba y el rendimiento del motor eléctrico:

$$\eta_G = \eta_{Inst} \cdot \eta_{ME} = \eta_{Reg} \cdot \eta_B \cdot \eta_{ME} = \frac{P_N}{P_E}$$

Se recuerda que el principal objetivo de este trabajo es crear un procedimiento que ayude a seleccionar la mejor estrategia de regulación de un grupo de bombeo o, dicho de otra forma, que maximice el rendimiento global de una estación de bombeo actuando sobre el rendimiento de Regulación “ $\eta_{Reg}$ ”.

#### 1.4.6 BOMBAS DE VELOCIDAD VARIABLE

Se le llama bomba de velocidad variable (en adelante *BVV*) al conjunto formado por bomba y variador de frecuencia. Será este último elemento el que, actuando sobre el motor eléctrico, posibilite a la bomba cambiar su velocidad de giro. Este fenómeno físico se puede entender a partir de la siguiente expresión:

$$f = \frac{P \cdot N}{60} \quad \text{de donde} \quad N = \frac{60 \cdot f}{P}$$

Siendo “ $f$ ” la frecuencia en Hz (valor de 50 Hz en la red eléctrica española), “ $P$ ” el número de pares de polos del motor eléctrico y “ $N$ ” la velocidad de giro en rpm. Así pues, si reducimos o aumentamos la frecuencia, estamos actuando de forma directamente proporcional sobre la velocidad de giro “ $N$ ”.

Llamamos “ $\alpha$ ” a la relación que hay entre la velocidad real “ $N$ ” que está imponiendo el Variador y la velocidad nominal “ $N_0$ ” (velocidad que tendría la bomba sin variador). Esto es:

$$\alpha = \frac{N}{N_0}$$

No es objetivo de este trabajo deducir las leyes de semejanza. Es suficiente con entender que mediante ellas, podemos modelar el comportamiento de una bomba a velocidades diferentes de la nominal.

Si es relevante entender el concepto de punto de funcionamiento homólogo. Son estos los puntos del espacio “ $HQ$ ” que perteneciendo a curvas motrices de distinta velocidad (pero de la misma bomba), tienen el mismo rendimiento.

De esta forma, los puntos de funcionamiento homólogos, para distintas velocidades de giro, se parametrizarán mediante la siguiente expresión parabólica:

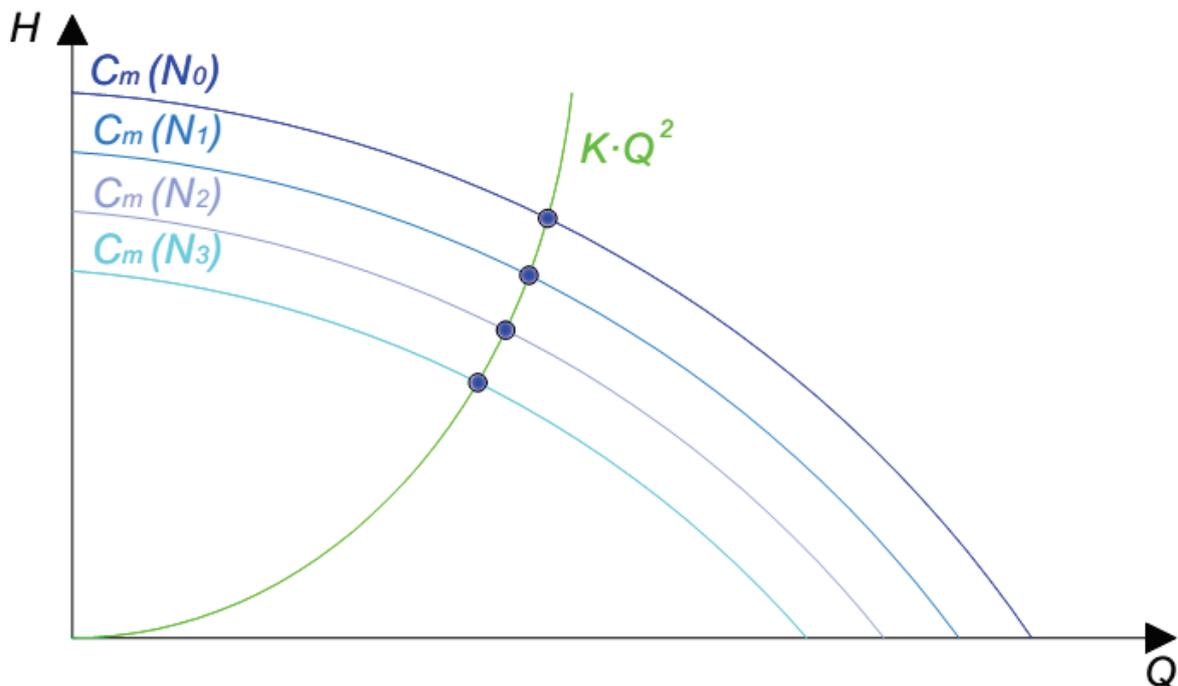
$$H(Q) = K_i \cdot Q^2$$

Mientras que la curva motriz de una *BVV* quedará modificada de la forma siguiente:

$$H(Q) = A \cdot \alpha^2 + B \cdot \alpha \cdot Q + C \cdot Q^2$$

En la siguiente figura se observa que efectos produce el variador de frecuencia sobre la curva motriz de la bomba, en este caso, reduciendo su velocidad de giro. Así pues la curva " $C_m(N_0)$ " se corresponde con la curva motriz girando la bomba a velocidad nominal (velocidad que tendría la bomba sin variador,  $\frac{N_0}{N_0} = \alpha_0 = 100\%$ ), " $C_m(N_1)$ " se corresponde con la curva motriz girando la bomba a una velocidad menor que la nominal ( $\frac{N_1}{N_0} = \alpha_1 < 100\%$ ) y " $C_m(N_2)$ " se corresponde con la curva motriz girando la bomba a una velocidad menor que la nominal y menor que " $N_1$ " ( $\frac{N_1}{N_0} > \frac{N_2}{N_0} = \alpha < 100\%$ ).

También se observa cómo evoluciona un Punto de Funcionamiento cualquiera que mantiene el mismo rendimiento (punto homólogo).



*FIGURA 7: BOMBA DE VELOCIDAD VARIABLE A DIFERENTES VELOCIDADES. PUNTOS HOMÓLOGOS*

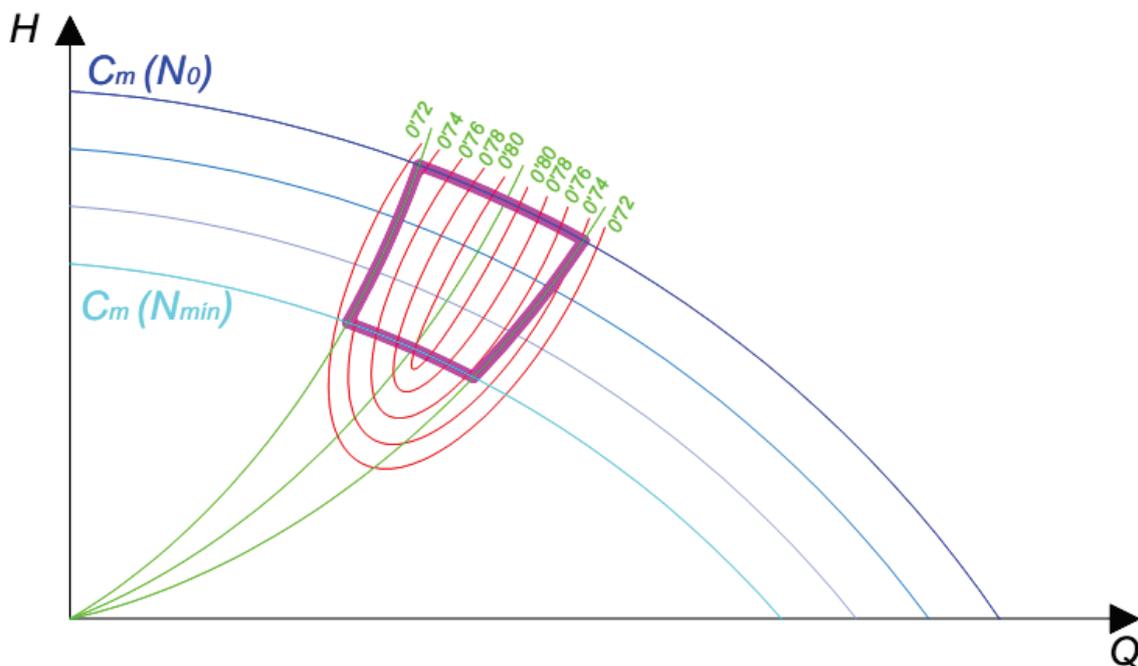
### 1.4.7 COLINAS DE ISORRENDIMIENTO

Sin embargo, en la práctica, las parábolas citadas en el apartado anterior no se cumplen de forma estricta. El rendimiento, a un lado y al otro del punto de rendimiento máximo en la

curva motriz nominal, se desvía conforme cambiamos de curva motriz bajando la velocidad de giro, formando curvas distorsionadas que alteran las leyes de semejanza.

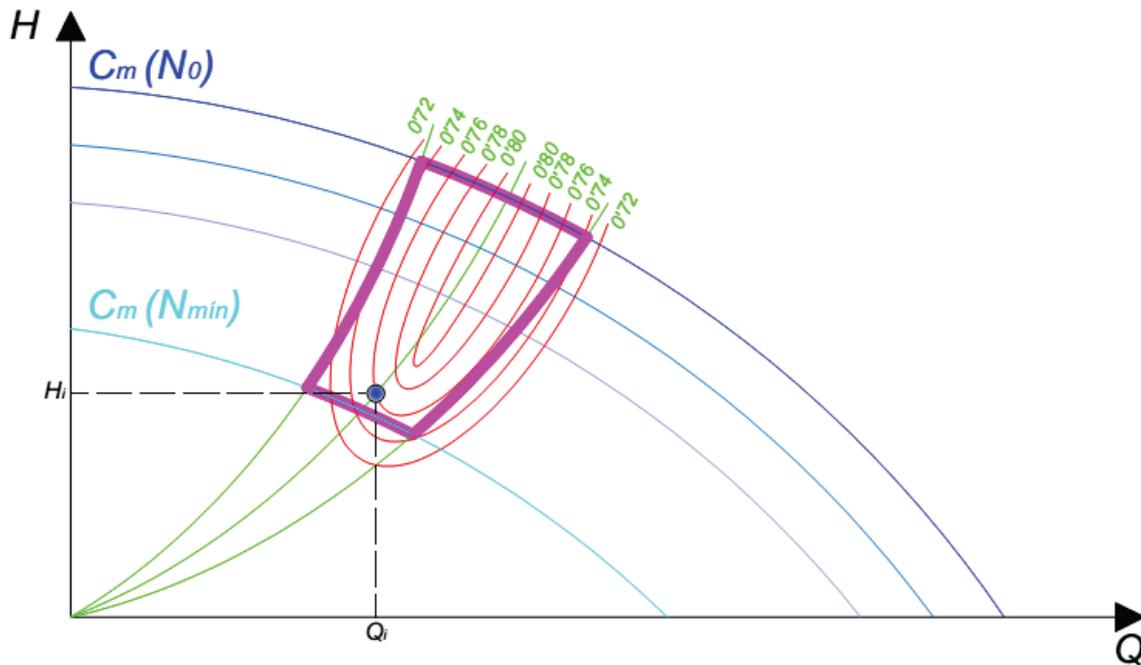
En la FIGURA 8 se muestran las diferentes curvas motrices que adopta una “BVV” cuando el variador disminuye la velocidad de giro. Se plantea una zona útil y, de forma superpuesta a ésta, las conocidas como colinas de isorrendimiento (por su similitud a una colina en un mapa topográfico).

En este caso, incluso teniendo en cuenta lo explicado, los posibles puntos de funcionamiento encerrados en la zona útil no variarán en exceso de lo esperado.



**FIGURA 8: COLINAS DE ISORRENDIMIENTO**

Por otro lado, en la FIGURA 9 podemos observar una figura similar. Diferentes curvas motrices que adopta una “BVV” cuando el variador disminuye la velocidad de giro. Se plantea una zona útil y, de forma superpuesta a ésta, las colinas de isorrendimiento. En este caso, la velocidad de giro mínima permitida, tal como se deduce viendo la zona útil, es menor que en el caso anterior.



**FIGURA 9: COLINAS DE ISORRENDIMIENTO. PF. CON RENDIMIENTO MENOR AL ESPERADO.**

Se puede observar que para un punto de funcionamiento cualquiera “ $(Q_i, H_i)$ ” situado como se muestra en la figura, le correspondería según las leyes de semejanza, un rendimiento mayor al 0’8, sin embargo, observando las colinas de isorrendimiento, solo tiene un 0’76.

De esta forma se pone de manifiesto la necesidad de poner un límite al error que se asume al calcular el rendimiento de un punto de funcionamiento en una curva motriz diferente a la nominal. En conclusión, cuando más reducimos la velocidad de giro, más incrementamos este error.

El parámetro que acota este error es la relación de velocidades mínima “ $\alpha_{\min}$ ”.

### 1.4.8 RENDIMIENTO DE LA BOMBA

El rendimiento de una bomba varía para cada punto de funcionamiento posible en el espacio “ $HQ$ ”. Esta variación se puede expresar para una bomba de velocidad fija (en adelante  $BVF$ ) como:

$$\eta_F(Q) = D \cdot Q - E \cdot Q^2$$

Donde “ $D$ ” y “ $E$ ” son los coeficientes que caracterizan el rendimiento de cada bomba en cuestión.

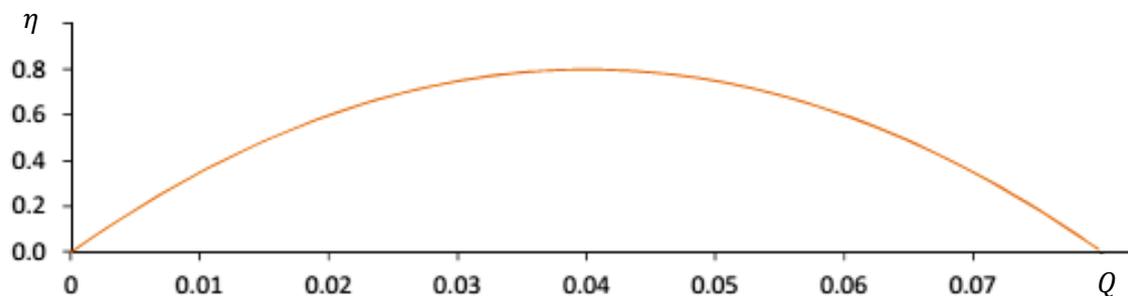
El rendimiento máximo se alcanzará para:

$$\frac{d\eta}{dQ} = 0 = D - 2 \cdot E \cdot Q$$

De donde:

$$Q = \frac{D}{2 \cdot E}$$

Por tanto la función del Rendimiento de la Bomba tiene el aspecto de una parábola negativa cuya rama creciente comienza en el origen. Tal como se muestra en la siguiente figura:



**FIGURA 10: RENDIMIENTO DE LA BOMBA**

Para el caso de una *BVV*, la ecuación de rendimiento debe ser afectada por la velocidad de giro de alguna forma, esto es:

$$\eta_V(Q) = D \cdot \frac{Q}{\alpha} - E \cdot \left(\frac{Q}{\alpha}\right)^2$$

Es evidente que si la *BVV* gira a velocidad nominal, su ecuación de rendimiento se puede simplificar a la expresión utilizada para una *BVF*.

Tal como se apunta en el apartado anterior, se debe tener en cuenta que las curvas así calculadas son teóricas. Para conocer las curvas reales es necesario realizar un ensayo.

#### **1.4.9 PENALIZACIÓN DEL RENDIMIENTO MEDIANTE SARBU-BORZA**

No es objeto de este trabajo desarrollar las conclusiones expuestas por el profesor Angus R. Simpson y la investigadora asociada Angela Marchi, (ambos de la Universidad de Adelaida en

Australia) en el artículo *"Evaluating the approximation of the affinity laws and improving the estimate of the efficiency for variable speed pumping"* presentado en enero de 2013. Pero dada la orientación de este trabajo por resolver la simulación del caso general de un equipo de bombeo, parece ineludible incluir la expresión aconsejada en el artículo nombrado para modificar el rendimiento en los casos que se crea oportuno.

La expresión en cuestión es:

$$\eta(SB) = 1 - (1 - \eta) \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{0,1}$$

Donde " $\eta(SB)$ " es el rendimiento modificado, " $\eta$ " es el rendimiento definido por las leyes de semejanza, " $N_1$ " es la velocidad a la que gira el motor y " $N_2$ " es la velocidad nominal.

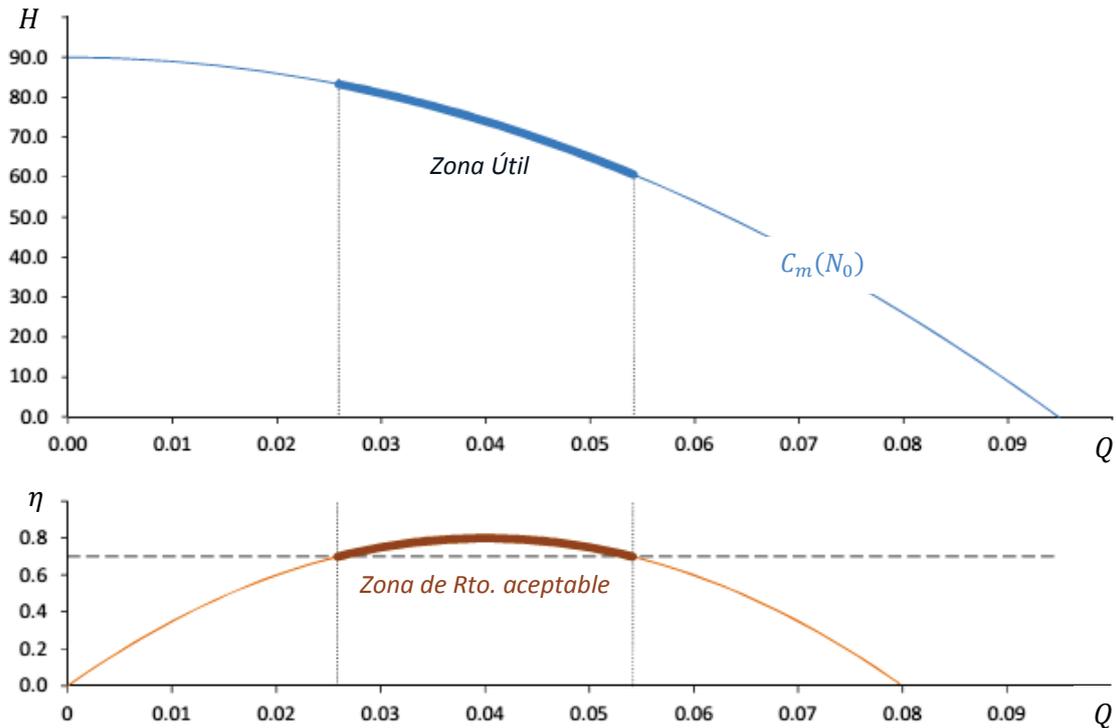
De esta forma, si " $N_1 < N_2$ " se produce penalización en el rendimiento. Y si " $N_1 = N_2$ ", no habrá penalización. Es evidente que la expresión no es válida cuando " $N_1 > N_2$ ".

Esta expresión fue propuesta en primera instancia por Sarbu y Borza en 1998 y Simpson-Marchi recomienda su uso, especialmente, para pequeñas bombas (5'5 Kw en el estudio realizado).

#### **1.4.10 ZONA ÚTIL DE UNA BOMBA DE VELOCIDAD FIJA**

Se le llama Zona Útil a la zona de la curva motriz para cuyos puntos se obtiene un rendimiento mayor o igual al rendimiento mínimo que hayamos impuesto. Es por tanto un condicionante de naturaleza económica. De esta forma, a mayor exigencia de rendimiento, más estrecha será la Zona Útil.

En la FIGURA 11 se aprecia, en color marrón, la curva de rendimiento en función del caudal que tiene una bomba dada. Si marcamos un rendimiento mínimo (en este caso 70%) los puntos que quedan por encima de esta exigencia conformarán la zona de rendimiento aceptable. Traspasando los caudales límites a la curva motriz queda definida la zona útil de funcionamiento de la bomba dada (resaltada en color azul).

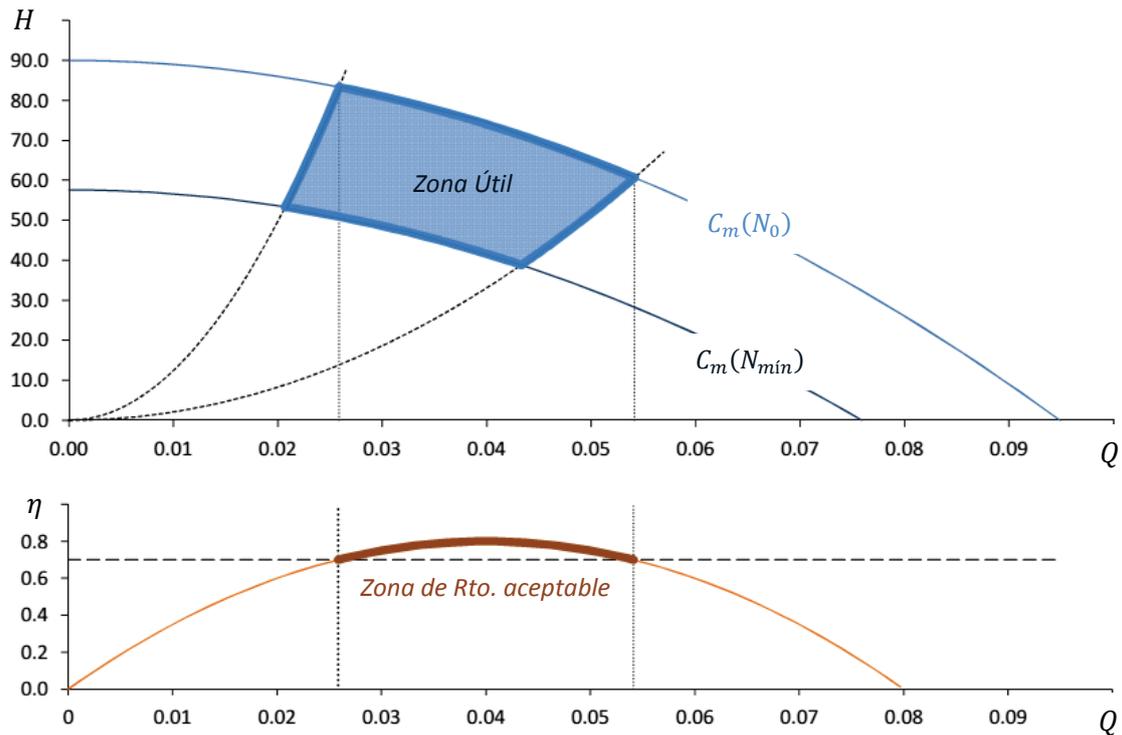


**FIGURA 11: ZONA ÚTIL DE UNA BOMBA DE VELOCIDAD FIJA**

#### 1.4.11 ZONA ÚTIL DE UNA BOMBA DE VELOCIDAD VARIABLE

Como ya se ha explicado, cuando se incorpora un variador de velocidad al equipo de bombeo, este adquiere la capacidad de poder variar su velocidad de giro. De esta forma, la zona útil pasará a ser un área que para ser definida necesita, además de los datos utilizados en el apartado anterior (*BVF*), conocer la menor relación de velocidades aceptada " $\alpha_{\min}$ ".

En la FIGURA 12 se observa el procedimiento para definir el área que conforma la zona útil de una *BVV* dada. Una vez se tienen marcados los extremos que definen los puntos de la curva motriz " $C_m(N_0)$ " con rendimiento aceptable, se trazan las parábolas de isorrendimiento que pasan por estos extremos. La intersección de estas parábolas con la curva motriz de velocidad mínima " $C_m(N_{\min})$ " determina los puntos extremos homólogos. La zona útil queda definida por el área encerrada por las curvas mencionadas, siendo los vértices los puntos extremos y los puntos extremos homólogos.



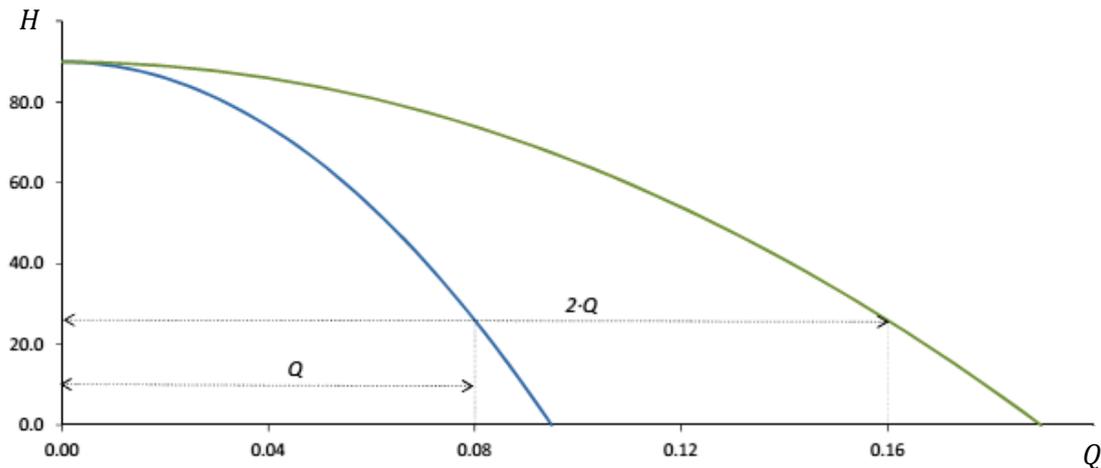
**FIGURA 12: ZONA ÚTIL DE UNA BOMBA DE VELOCIDAD VARIABLE**

#### 1.4.12 ASOCIACIÓN DE BOMBAS EN PARALELO

Todos los conceptos comentados hasta el momento hacen referencia a un equipo de bombeo formado por una bomba. Pero en los bombeos reales generalmente se instalan varias bombas con el fin de escalonar la altura deseada para un mismo caudal (serie) o para partir el caudal manteniendo la misma altura (paralelo). Este apartado se centra en el último tipo de asociación por pertenecer a esta naturaleza el escenario genérico planteado.

Se puede reconocer una asociación de bombas en paralelo cuando todas las bombas comparten la aspiración y el retorno. Es evidente la ventaja que presenta a nivel de mantenimiento, ya que si se avería una bomba se puede dar cierto servicio con las restantes, en contraposición con un sistema equivalente de una bomba donde una avería puede dejar fuera de servicio la estación. Además, este tipo de asociación posibilita, de forma inicial, cierta regulación al poder bombear con todas o parte de las bombas instaladas.

En la FIGURA 13 se observa en azul la curva motriz de una *BVF* y en verde la curva motriz producto de la asociación de esta bomba con otra de similares características. Como no podía ser de otra forma, para cada altura que se estudie, el caudal de " $2 \times BVF$ " será el doble que el de " $1 \times BVF$ ".



**FIGURA 13: CURVA MOTRIZ DE 2XBVF EN PARALELO**

Análiticamente, la curva motriz resultado de la asociación en paralelo de " $n_F$ " bombas del tipo *BVF* será:

$$H(Q_F) = A + B \cdot \frac{Q_F}{n_F} + C \cdot \left(\frac{Q_F}{n_F}\right)^2$$

Donde " $Q_F$ " es el caudal total trasegado por las " $n_F$ " *BVF*.

Análogamente, la curva motriz resultado de la asociación en paralelo de " $n_V$ " bombas del tipo *BVV* será:

$$H(Q_V) = A \cdot \alpha^2 + B \cdot \alpha \cdot \frac{Q_V}{n_V} + C \cdot \left(\frac{Q_V}{n_V}\right)^2$$

Donde " $Q_V$ " es el caudal total trasegado por las " $n_V$ " *BVV*.

Cuando se instalan en el mismo equipo, Bombas de Velocidad Variable y de Velocidad Fija, se debe tener en cuenta que el caudal total " $Q_T$ " debe ser igual a la suma del caudal de las *BVV* " $Q_V$ " y el de las *BVF* " $Q_F$ ". Esto es:

$$Q_T = Q_V + Q_F$$

En el caso de que las *BVV* estén funcionando a velocidad nominal ( $\alpha = 1$ ), se puede simplificar la formulación a:

$$H(Q_T) = A + B \cdot \frac{Q_T}{n_T} + C \cdot \left(\frac{Q_T}{n_T}\right)^2$$

Donde " $Q_T$ " es el caudal total y " $n_T$ " es el número total de bombas.

Por otro lado, la curva de rendimiento de una *BVF* perteneciente a una asociación en paralelo de " $n_F$ " bombas del tipo *BVF* será:

$$\eta_F(Q_F) = D \cdot \frac{Q_F}{n_F} - E \cdot \left(\frac{Q_F}{n_F}\right)^2$$

La curva de rendimiento de una *BVV* perteneciente a una asociación en paralelo de " $n_V$ " bombas del tipo *BVV* será:

$$\eta_V(Q_V) = D \cdot \frac{Q_V}{\alpha \cdot n_V} - E \cdot \left(\frac{Q_V}{\alpha \cdot n_V}\right)^2$$

Análogamente, la curva de rendimiento para una bomba incluida en una asociación en paralelo de un número de bombas de velocidad fija y variable " $n_T$ " (funcionando éstas últimas en condiciones nominales) será:

$$\eta_T(Q_T) = D \cdot \frac{Q_T}{n_T} - E \cdot \left(\frac{Q_T}{n_T}\right)^2$$

Evidentemente, al utilizar cualquiera de estas tres expresiones, se acepta que todas las bombas de la asociación son similares y tienen el mismo rendimiento de forma individual.

Cuando se estudia una asociación con *BVF* y *BVV* con funcionamiento distinto al nominal podemos relacionar las anteriores expresiones de forma ponderada tal que:

$$P_A = \frac{\gamma \cdot Q_T \cdot H_T}{\eta_T} = \frac{\gamma \cdot Q_V \cdot H_V}{\eta_V} + \frac{\gamma \cdot Q_F \cdot H_F}{\eta_F}$$

Donde igualamos la potencia total " $P_A$ " con la suma de la potencia " $P_A$ " de las *BVV* y la potencia " $P_A$ " de las *BVF*.

#### 1.4.13 REGULACIÓN ESCALONADA Y COMPARTIDA

Cuando un equipo de bombeo incluye varias *BVV*, la regulación puede ser:

- Escalonada: Si de las *BVV* instaladas solo se varía la velocidad de giro en una de ellas mientras las demás permanecen paradas a en funcionamiento nominal.
- Compartida: Se lleva a cabo con todas las *BVV* funcionando a la misma velocidad.

#### 1.4.14 ZONA DE COBERTURA DE LA CURVA DE CONSIGNA

Se le denomina zona de cobertura a la zona de la curva de consigna que queda incluida en las zonas útiles de las asociaciones de un escenario concreto.

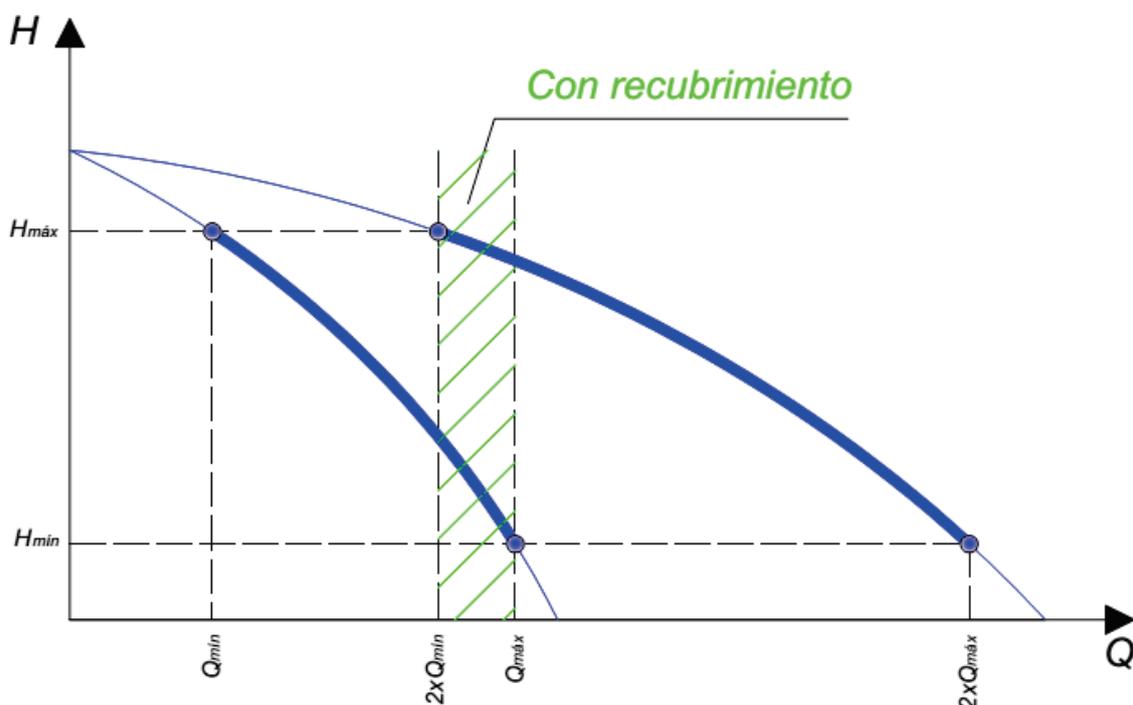
#### 1.4.15 RECUBRIMIENTO

Observando las formas de las curvas motrices de distintas bombas, se distinguen claramente 2 tipos de curvas:

- Curva característica plana: Cuando  $2 \cdot Q_{\min} < Q_{\max}$
- Curva característica vertical: Cuando  $2 \cdot Q_{\min} > Q_{\max}$

En la FIGURA 14, se puede observar un escenario  $2 \times BVF$  con curva motriz plana. Se distingue un segmento en el eje de los caudales que queda cubierto por sus dos asociaciones posibles (una bomba funcionando o las dos bombas funcionando). Este segmento va desde " $2 \cdot Q_{\min}$ " hasta " $Q_{\max}$ ".

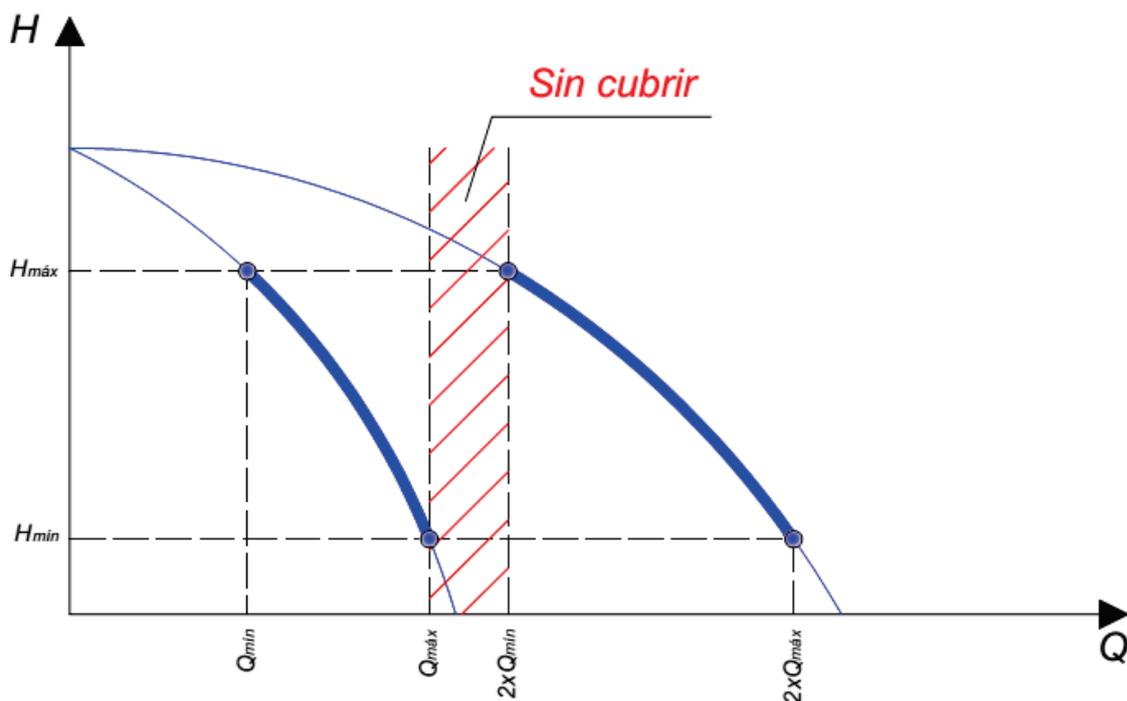
A esta zona en el eje de los caudales se le llama zona de recubrimiento y permite al sistema de regulación cambiar de asociación (poner en marcha, o paro, una bomba) sin perjuicio del rendimiento.



**FIGURA 14: ZONA DE RECUBRIMIENTO EN BOMBAS DE CARACTERÍSTICA PLANA**

Por otro lado, en la FIGURA 15 se puede observar un escenario  $2 \times BVF$  con curva motriz vertical. Se distingue un segmento en el eje de los caudales que no queda cubierto por ninguna de las dos asociaciones posibles (una bomba funcionando o las dos bombas funcionando). Este segmento va desde " $Q_{m\acute{a}x}$ " hasta " $2 \cdot Q_{m\acute{i}n}$ ".

Esta zona sin cubrir en el eje de los caudales puede crear problemas al sistema de regulación en el momento de cambiar de asociación (poner en marcha, o paro, una bomba) perjudicando el rendimiento.



**FIGURA 15: ZONA SIN CUBRIR EN BOMBAS CON CARACTERÍSTICA VERTICAL**

## 1.5 ESTADO DEL ARTE

Si bien es cierto que la metodología básica que se pretende aplicar es conocida en el ámbito hidráulico, no se encuentra precedente en el intento de diseñar y llevar a cabo un modelo matemático que sirva como herramienta para la optimización de equipos de bombeo directo.

La originalidad de esta propuesta radica en la parametrización del proceso de construcción de las diferentes Zonas Útiles de las asociaciones de bombas implementadas que permite una visualización directa de las mismas, pudiendo:

- Observar cómo y en qué medida se recubre la Curva de Consigna.
- Interactuar con el modelo realizando variaciones de Rendimiento Mínimo, Relación de Velocidades, Curva Motriz, Curva de Consigna, etc. Y observando las consecuencias que provocan los cambios producidos.
- Exportar los resultados hidráulicos al modelo Energético para completar el estudio.

Se pretende por tanto implementar un modelo de simulación que sirva de soporte y apoyo a la decisión del técnico en lo concerniente a la elección de la mejor estrategia de Regulación de equipos de bombeo desde el punto de vista Energético.



***CAPÍTULO***

---

***2. MODELO HIDRÁULICO DE SIMULACIÓN Y  
VISUALIZACIÓN***



## 2.1 INTRODUCCIÓN

Cuando se gesta un modelo matemático de esta naturaleza, se inicia el proceso intentando definir los objetivos que se desean cubrir. Son estos objetivos los que caracterizan al modelo, ya que durante las fases de diseño y construcción de éste, se toman decisiones (en base a los objetivos referidos) que limitan posteriormente su operatividad, su rango de aplicación y definen su esencia.

De esta forma, el principal objetivo que se le impone a este modelo es que sea capaz de simular, bien un escenario de bombeo real o un escenario no real pero factible, devolviendo los resultados oportunos. Evidentemente la simulación no será única, por tanto el modelo debe permitir con razonable facilidad la repetición del proceso con cambio de datos.

El segundo objetivo que se le pide al modelo es que sea de naturaleza fundamentalmente visual. Es evidente que incluye la pertinente programación analítica para resolver los cálculos, pero dada la complejidad del campo que se estudia, se estima necesario que la solución sea visualizada por el usuario. Dicho de otra forma, la solución analítica debe integrarse en un entorno visual que ayude al usuario a entenderla.

Una vez cumplidos estos objetivos, podemos incluir otros demandables, en la medida de lo posible, a cualquier modelo matemático. Fundamentalmente, el modelo debe ser robusto y debe carecer de complejidad innecesaria.

## 2.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS EXIGENCIAS DE OPERACIÓN

Para que el modelo hidráulico tenga la operatividad deseada, un paso fundamental a definir es la implementación de los parámetros que constituyen la base de los cálculos a desarrollar. Esto es, se debe explicar cuáles son los “*inputs*” del modelo y de qué forma se introducen.

### 2.2.1 NÚMERO DE BOMBAS

El primer parámetro que se incluye en el modelo, no puede ser otro que el número total de bombas “ $n_T$ ” que componen el equipo de bombeo. A su vez el usuario deberá introducir las que son *BVV* y las que son *BVF* mediante los parámetros “ $n_V$ ” y “ $n_F$ ” respectivamente.

De esta forma, se debe cumplir que:

$$n_T = n_F + n_V$$

### 2.2.2 CURVA MOTRIZ

Es sin duda el input principal, ya que caracteriza la relación "HQ" del tipo de bombas a simular.

Tal como se ha explicado, la Curva Motriz usualmente se parametriza con la expresión siguiente:

$$H(Q) = A + B \cdot Q + C \cdot Q^2$$

Donde los parámetros "A", "B" y "C" son realmente los inputs que deberá introducir el usuario. Cabe recordar que el coeficiente "C" debe ser negativo. En este caso se supone una altura de aspiración " $Z_a$ " nula.

No es objeto de este trabajo analizar los parámetros que mejor definen el comportamiento de una bomba concreta, por este motivo, el usuario deberá poseer esta información antes de utilizar este modelo.

### 2.2.3 PARÁMETRO " $\alpha$ " MÍNIMO Y MÁXIMO

Para poder simular el comportamiento de una *BVV* se deben definir los límites de velocidad de giro de la bomba. El parámetro utilizado para ello es " $\alpha$ ", que relaciona la velocidad real y la velocidad nominal. De esta forma se utiliza el input " $\alpha_{mín}$ " para señalar la mínima relación de giro permitida y " $\alpha_{máx}$ " para señalar la máxima relación de giro permitida.

Estos dos inputs afectan directamente a las dimensiones de las zonas útiles de las asociaciones del escenario en estudio. De esta forma, a menor " $\alpha_{mín}$ " y a mayor " $\alpha_{máx}$ " mayor serán las áreas de las zonas útiles. Por el contrario, a mayor " $\alpha_{mín}$ " y a menor " $\alpha_{máx}$ " menor serán el área de las zonas útiles.

Cuando se le da a " $\alpha_{máx} > 1$ " se le está diciendo al modelo que las *BVV* del escenario en estudio pueden superar su velocidad nominal " $N_0$ ". Si el escenario es elegido para su instalación, el técnico deberá tener en cuenta la circunstancia expuesta y el aumento de potencia eléctrica que ésta acarrea, ya que el motor eléctrico y el resto de la instalación eléctrica, si no se advierte, se dimensionan para condiciones nominales.

Se debe entender que el modelo construye las diferentes zonas útiles a partir de este dato (entre otros). Nos marca, por tanto, un límite de funcionamiento aceptado. Debe ser el usuario el que decida qué valor meter en función de las restricciones que estime convenientes.

El modelo permite con facilidad, calcular y recalcular, variando estos parámetros de forma reiterada visualizando rápidamente las consecuencias de estas variaciones en el mapa de zonas de funcionamiento óptimo.

#### 2.2.4 CURVA DE RENDIMIENTO

Tal como se ha explicado, la Curva de Rendimiento de la Bomba usualmente se parametriza con la expresión siguiente:

$$\eta(Q) = D \cdot Q - E \cdot Q^2$$

Donde los parámetros "D" y "E" son los inputs que deberá introducir el usuario. Cabe recordar que el coeficiente "E" debe ser Positivo.

No es objeto de este trabajo analizar los parámetros que mejor definen el comportamiento de una bomba concreta, por este motivo, el usuario deberá poseer esta información antes de utilizar el presente modelo.

#### 2.2.5 RENDIMIENTO MÍNIMO

Input esencial para definir las Zonas Útiles de funcionamiento óptimo. Una vez introducido por el usuario, el modelo resolverá directamente la ecuación de rendimiento mínimo hallando las dos soluciones "q<sub>1</sub>" y "q<sub>2</sub>" y sus respectivas alturas "H<sub>1</sub>" y "H<sub>2</sub>".

La incorporación de estos puntos sobre la Curva Motriz define la Zona Útil de la bomba en cuestión.

#### 2.2.6 PENALIZACIÓN DEL RENDIMIENTO MEDIANTE SARBU-BORZA

Tal como se ha explicado anteriormente, en la realidad, el rendimiento definido por las leyes de semejanza debe ser afectado por la expresión de Sarbu-Borza, en determinados casos. Esto es:

$$\eta_{SB} = 1 - (1 - \eta) \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{0,1} = 1 - (1 - \eta_{AF})\alpha^{-0,1}$$

Donde " $\eta_{SB}$ " es el rendimiento modificado, " $\eta_{AF}$ " es el rendimiento definido por las leyes de semejanza y " $\alpha$ " la relación de velocidades " $N_1/N_2$ ".

El modelo incluye la posibilidad de activar la modificación descrita a decisión del usuario. De esta forma se puede también estudiar el efecto que tiene un mismo escenario incluyendo, o no, esta opción.

### 2.2.7 PARÁBOLAS DE ISORRENDIMIENTO

Tal como se ha explicado anteriormente las leyes de semejanza parametrizan la unión de todos los puntos homólogos como una parábola. De esta forma podemos definir las Parábolas de Isorrendimiento mediante la siguiente expresión:

$$H(Q) = K_i \cdot Q^2$$

En nuestro caso, conocidos los puntos " $(q_1, H_1)$ " y " $(q_2, H_2)$ " y de forma encadenada con la resolución del apartado de rendimiento mínimo, el modelo halla los valores " $K_1$ " y " $K_2$ " para cada asociación de bombas, quedando resueltas las parábolas de isorrendimiento.

### 2.2.8 RESOLUCIÓN DE UNA ZONA ÚTIL

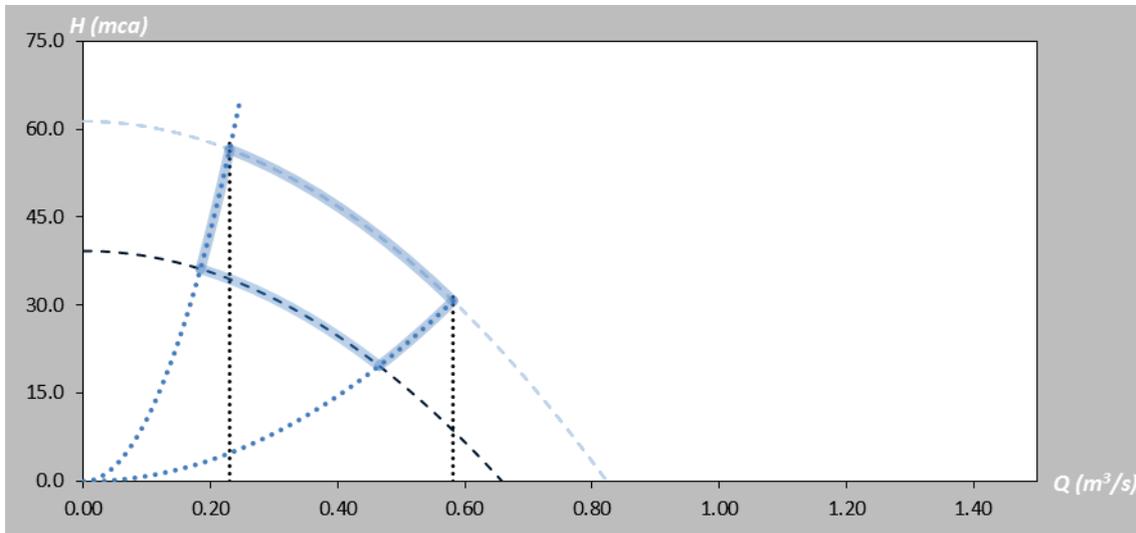
Una vez implementados los inputs explicados hasta el momento, se dispone de toda la información necesaria para construir y visualizar la zona útil de la bomba o asociación de bombas en cuestión.

Supongamos un escenario de 2 bombas, ambas de velocidad variable. En este caso, solo es posible formar dos asociaciones,  $1 \times BVV$  (una bomba funcionando) y  $2 \times BVV$  (las dos bombas funcionando).

La dinámica para construir la zona útil de la primera asociación es la siguiente:

- Se construye la Curva Motriz Nominal de la  $BVV$ . Es decir, la  $BVV$  funciona en condiciones nominales.
- Se construye la Curva Motriz Mínima de la  $BVV$ . Es decir, la  $BVV$  funciona en condiciones de relación de giro mínima " $\alpha_{mín}$ ".
- Se construye la Curva Motriz Máxima de la  $BVV$ . Es decir, la  $BVV$  funciona en condiciones de relación de giro máxima " $\alpha_{máx}$ ".
- Con los valores conocidos de " $K_1$ " y " $K_2$ ", construimos las Parábolas de Isorrendimiento de la  $BVV$ .
- La zona útil quedará definida como el área delimitada por las 4 curvas construidas.

La FIGURA 16 muestra el resultado del proceso explicado, esto es, la zona útil (color azul) para la asociación "1 × BVV". El modelo construye las curvas mencionadas y señala el área encerrada por estas curvas.



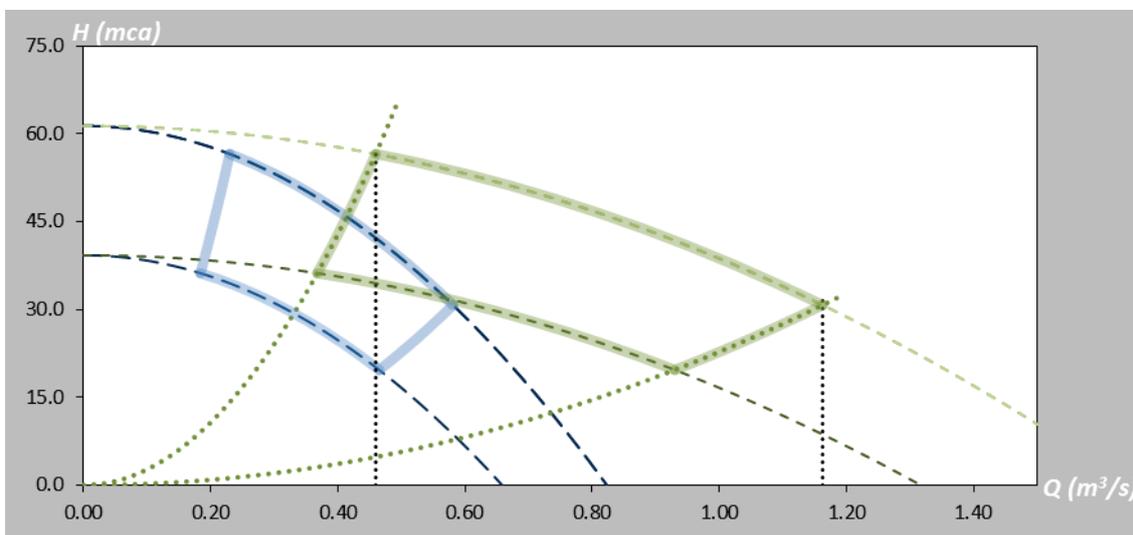
**FIGURA 16: ZONA ÚTIL 1xBVV A VELOCIDAD DE GIRO MÁXIMA = NOMINAL**

De forma análoga, la dinámica para construir la zona útil de la segunda asociación (2 × BVV) es la siguiente:

- Se construye la Curva Motriz Nominal de las BVV. Es decir, las BVV funcionan en condiciones nominales.
- Se construye la Curva Motriz Mínima de las BVV. Es decir, las BVV funcionan en condiciones de relación de giro mínima " $\alpha_{mín}$ ".
- Se construye la Curva Motriz Máxima de las BVV. Es decir, las BVV funcionan en condiciones de relación de giro máxima " $\alpha_{máx}$ ".
- Con los valores conocidos de " $K_1$ " y " $K_2$ ", construimos las Parábolas de Isorrendimiento de las BVV.
- La zona útil quedará definida como el área delimitada por las 4 curvas construidas.

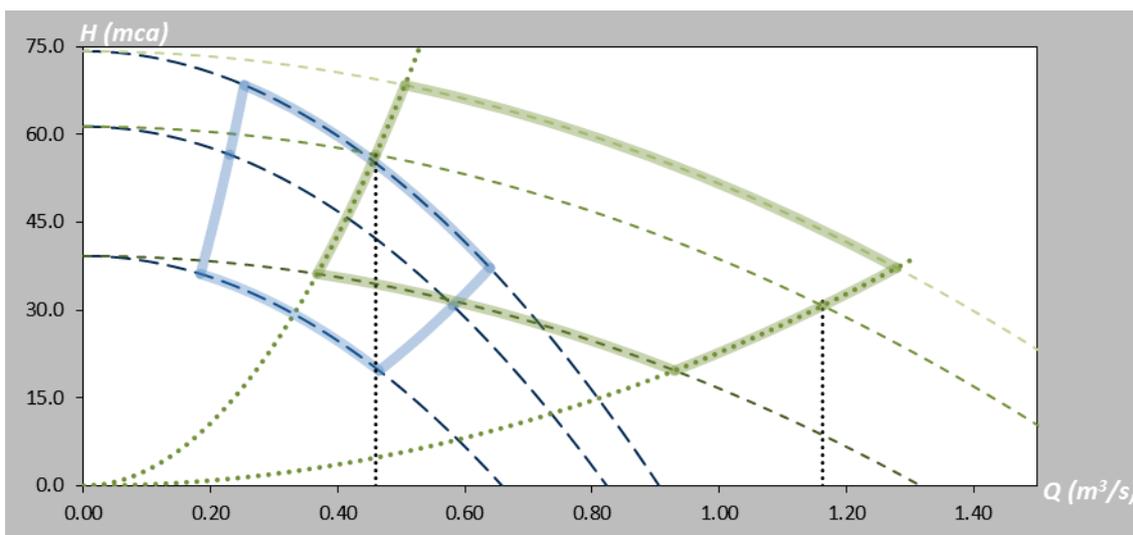
Cabe destacar que el modelo, al dibujar la zona útil de una asociación, se agrega al mismo espacio "HQ" donde se encuentra la zona útil de la anterior asociación. A esta acción se le denomina apilamiento.

En la FIGURA 17 muestra el resultado del proceso explicado, esto es, la zona útil (color verde) para la asociación "2 x BVV". El modelo construye las curvas mencionadas y señala el área encerrada por estas curvas. Cabe destacar que al ser " $\alpha_{m\acute{a}x} = 1$ " las curvas motrices nominal y máxima están superpuestas.



**FIGURA 17: ZONA ÚTIL 2x BVV A VELOCIDAD DE GIRO MÁXIMA = NOMINAL**

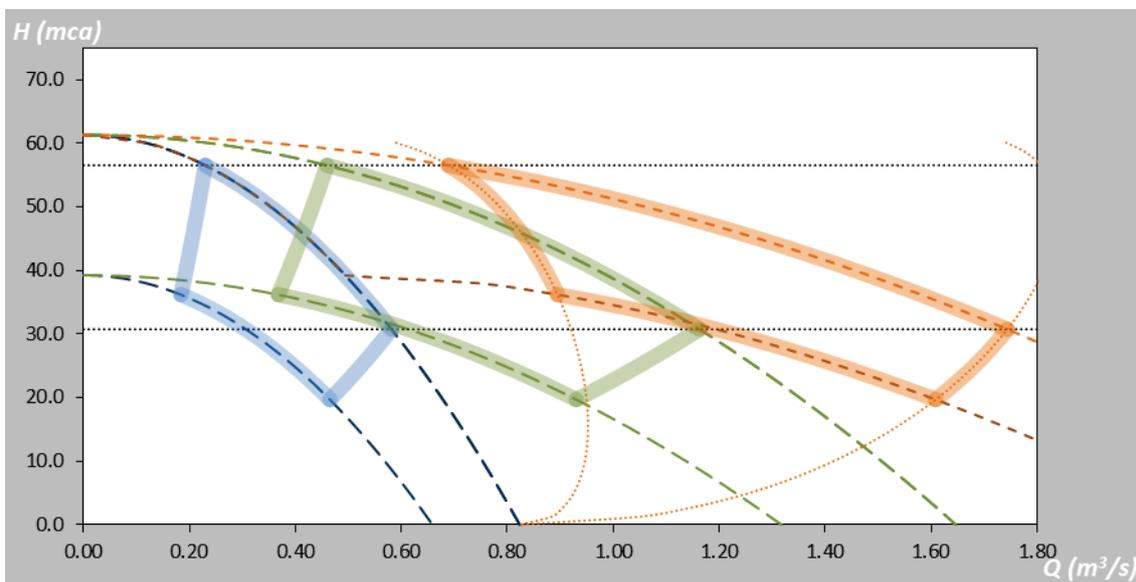
Si variamos el input " $\alpha_{m\acute{a}x}$ " dándole, por ejemplo, un valor de 1'1, la Curva Motriz Máxima se despegue de la Nominal. Tal como se muestra en la FIGURA 18:



**FIGURA 18: ZONA ÚTIL 2x BVV A VELOCIDAD DE GIRO MÁXIMA > NOMINAL**

### 2.2.9 COMPOSICIÓN DEL MAPA DE ZONAS ÚTILES

Para conseguir el máximo rendimiento, el modelo debe permitir apilar las diferentes zonas útiles que se deducen de las distintas asociaciones permitidas para un escenario de un equipo de bombeo concreto. Es decir, suponiendo un equipo de bombeo formado por una bomba de velocidad fija ( $1 \times BVF$ ) y dos bombas de velocidad variable ( $2 \times BVV$ ) y el orden de funcionamiento de asociaciones de bombas (impuesto por el técnico) es " $1 \times BVV$ "; " $2 \times BVV$ " y " $2 \times BVV + 1 \times BVF$ " el modelo debe calcular la zonas útiles de todas y cada una de las asociaciones descritas y mostrarlas apiladas en el mismo espacio " $HQ$ ". Tal como se puede observar en la FIGURA 19.



**FIGURA 19: ZONA ÚTIL 1XBVF + 2XBVV A VELOCIDAD DE GIRO MÁXIMA = NOMINAL**

Al aparecer las Curvas Motrices Máximas y Nominales superpuestas, se deduce que el escenario está parametrizado con funcionamiento nominal de los variadores.

### 2.2.10 CAUDALES MÍNIMO Y MÁXIMO

De las explicaciones de los presentes apartados, se deduce la necesidad de implementar 2 inputs más: Caudal Mínimo " $Q_{Mín}$ " y Caudal Máximo " $Q_{Máx}$ ".

De esta forma se limitan los valores que puede adquirir el Caudal Demandado, limitación que permitirá al usuario seguir obteniendo conclusiones con el modelo. Dicho de otra forma, estamos recortando la curva de consigna, reduciéndola al rango de funcionamiento real.

### 2.2.11 CURVA DE CONSIGNA

Tal como se ha explicado anteriormente, de forma habitual se parametriza la Curva de Consigna de un sistema hidráulico mediante una expresión parabólica. En este caso:

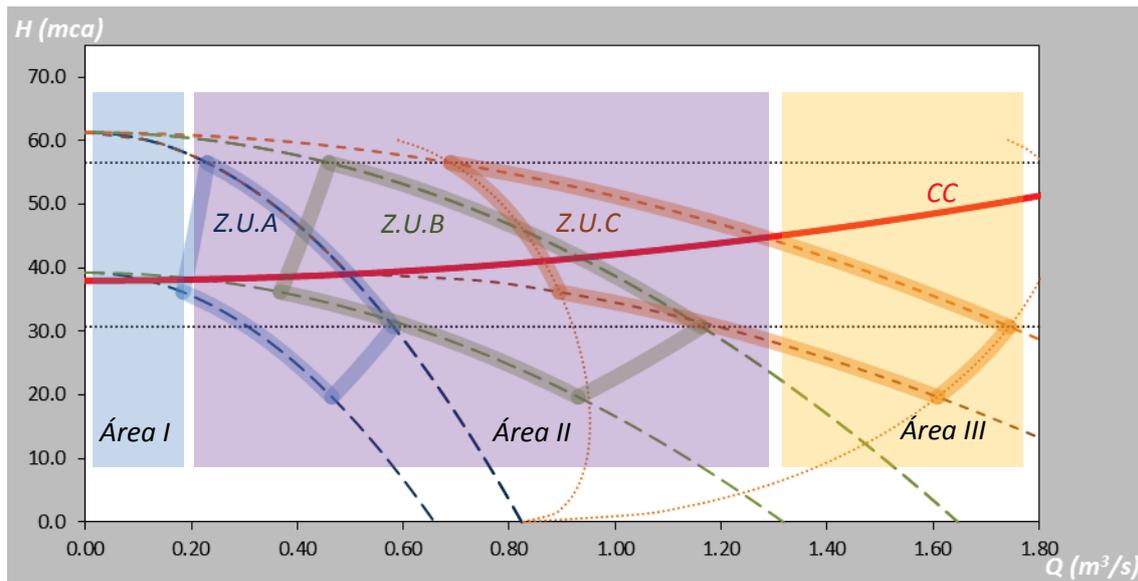
$$H_{CC} = G + J \cdot Q + L \cdot Q^2$$

Así que los inputs que se utilizan para simular la Curva de Consigna en el presente modelo son "G", "J" y "L".

De esta forma, una vez implementada se visualizará la curva de consigna en contraposición con el apilamiento de zonas útiles.

En la FIGURA 20 se observa la situación descrita. Con el fin de entender el mapa de zonas útiles presentado, se destacan tres áreas:

- Área I: Área donde la curva de consigna se observa descubierta respecto a las diferentes zonas útiles existentes. Ubicación anterior a las zonas útiles en el eje de caudales. Si el caudal mínimo se encuentra en esta zona, puede darse la circunstancia de que ciertos caudales demandados sean servidos con un rendimiento inferior al considerado como aceptable. Esta situación se puede solucionar, por ejemplo, instalando una bomba dimensionada para esta zona de la curva de consigna.
- Área II: Área donde la curva de consigna se observa cubierta, como mínimo por una de las zonas útiles existentes. Es deseable que la mayoría de los caudales demandados (mejor si fueran todos) se encuentren en esta zona, de esta forma aseguramos servir éstos en condiciones de rendimiento aceptable.
- Área III: Área donde la curva de consigna se observa descubierta respecto a las diferentes zonas útiles existentes. Ubicación posterior a las zonas útiles en el eje de caudales. Si el caudal máximo se encuentra en esta zona, puede darse la circunstancia de que ciertos caudales demandados sean servidos con un rendimiento inferior al considerado como aceptable. Si el equipo de bombeo está bien dimensionado no debe pasar esta situación.



**FIGURA 20: CURVA DE CONSIGNA SUPERPUESTA SOBRE EL APILAMIENTO DE ZONAS ÚTILES. "A".**

Si nos centramos en el Área II, podemos distinguir 3 subáreas, estas son:

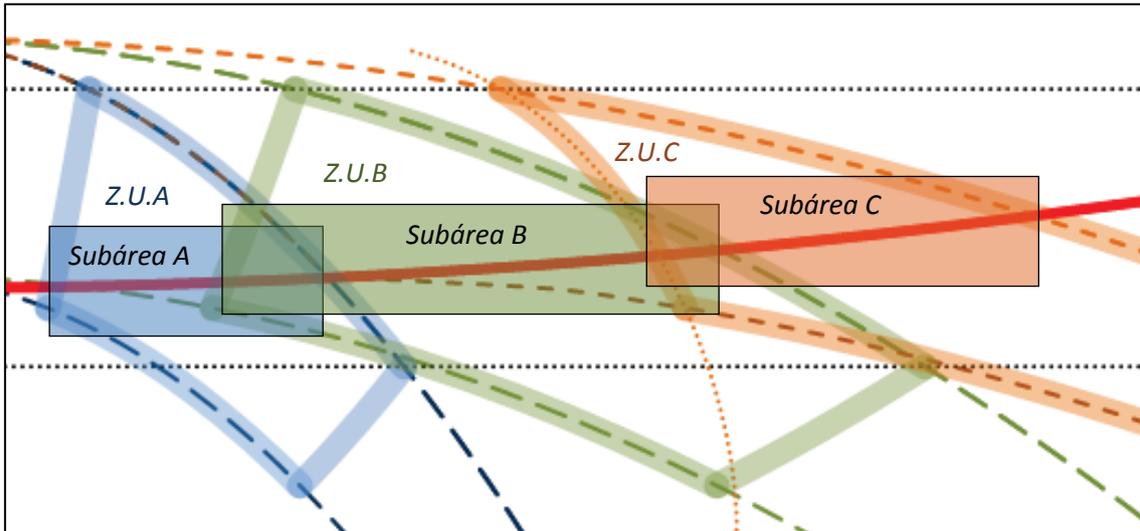
- Subárea A: Correspondiente con la porción de curva de consigna que está dentro de la zona útil A.
- Subárea B: Correspondiente con la porción de curva de consigna que está dentro de la zona útil B.
- Subárea C: Correspondiente con la porción de curva de consigna que está dentro de la zona útil C.

Obsérvese que, en este caso, existen intersecciones entre las distintas zonas especificadas. Esta situación facilita el cambio de asociación (paro o arranque de una bomba) durante el funcionamiento normal del equipo de bombeo.

### 2.2.12 IMPORTANCIA DE LA VISUALIZACIÓN DEL ESCENARIO

En el apartado anterior se explica cómo se implementa la curva de consigna y la lectura que se puede realizar del escenario una vez superpuesta al mapa de zonas útiles. Con el fin de expresar la importancia de la visualización ante la elección del equipo de bombeo, se exponen a continuación dos ejemplos de simulaciones que, en caso de darse, el técnico debería detectar y rechazar su elección.

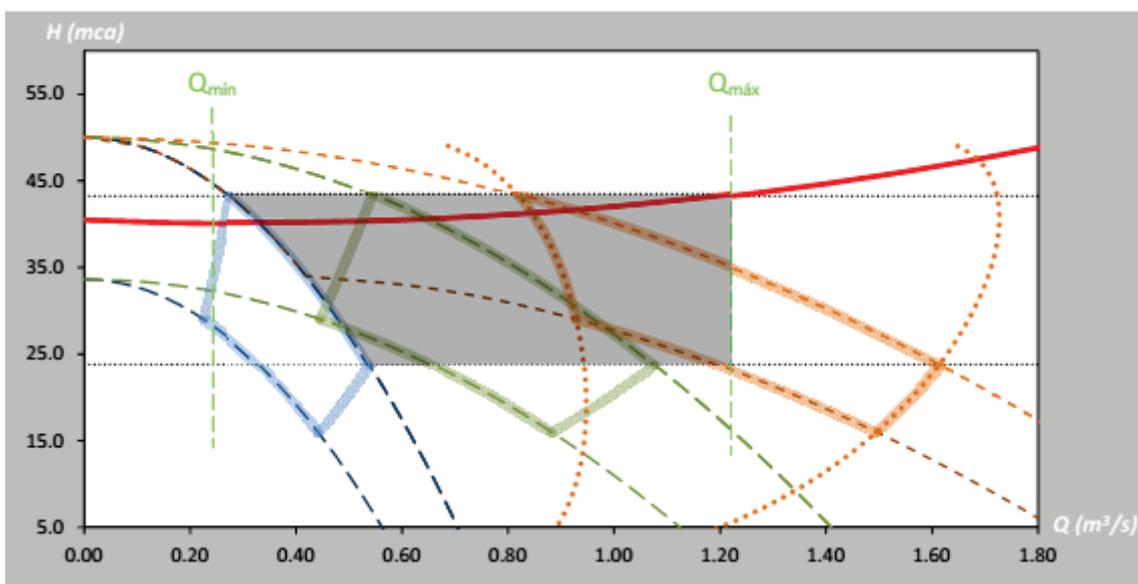
Se plantean dos ejemplos de escenarios, con el mismo sistema hidráulico de la FIGURA 20 y la FIGURA 21 (misma curva de consigna), pero con otros modelos de bomba diferentes.



**FIGURA 21: CURVA DE CONSIGNA SUPERPUESTA SOBRE EL APILAMIENTO DE ZONAS ÚTILES. "B".**

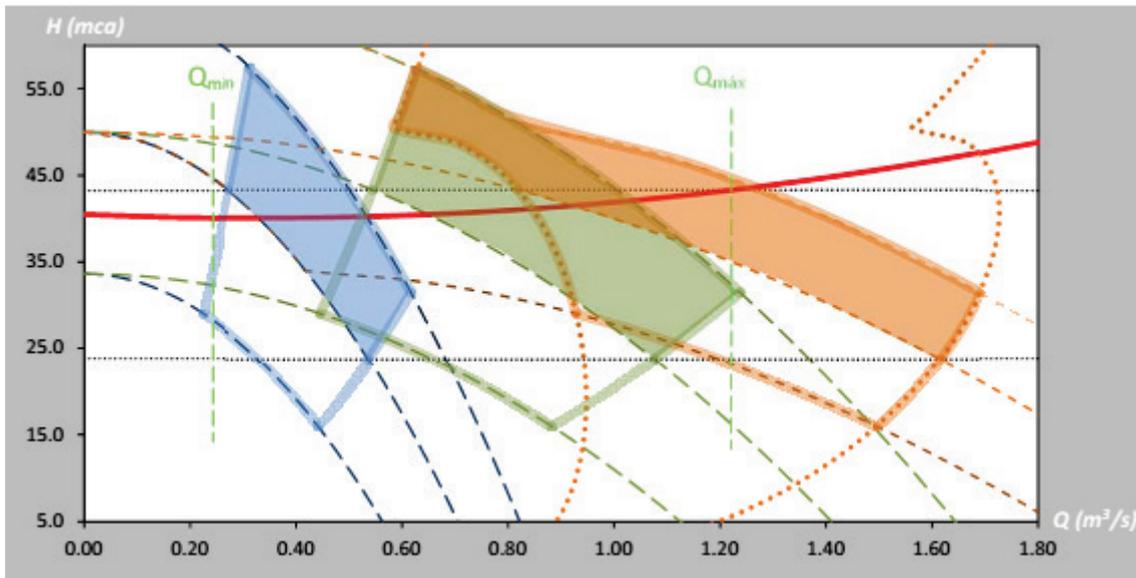
En la figura siguiente se plantea el primer escenario. Las bombas simuladas son de menor altura y se acepta un  $\eta_{\min} = 0'77$ .

Estudiando la situación expuesta se deduce que la cobertura de la curva de consigna es menor que en el caso anterior. Efectivamente, si la estudiamos con mayor atención, se observan zonas sin cobertura para los caudales cercanos a  $0'4 \left(\frac{m^3}{s}\right)$ , a  $0'8 \left(\frac{m^3}{s}\right)$  y a  $1'10 \left(\frac{m^3}{s}\right)$ . Esta situación implica que para un caudal demandado incluido en las zonas sin cobertura, no se cumplirá la condición de rendimiento aceptable. El sombreado muestra la zona donde la BVF funcionará con buen rendimiento.



**FIGURA 22: ESCENARIO NO ADECUADO 1**

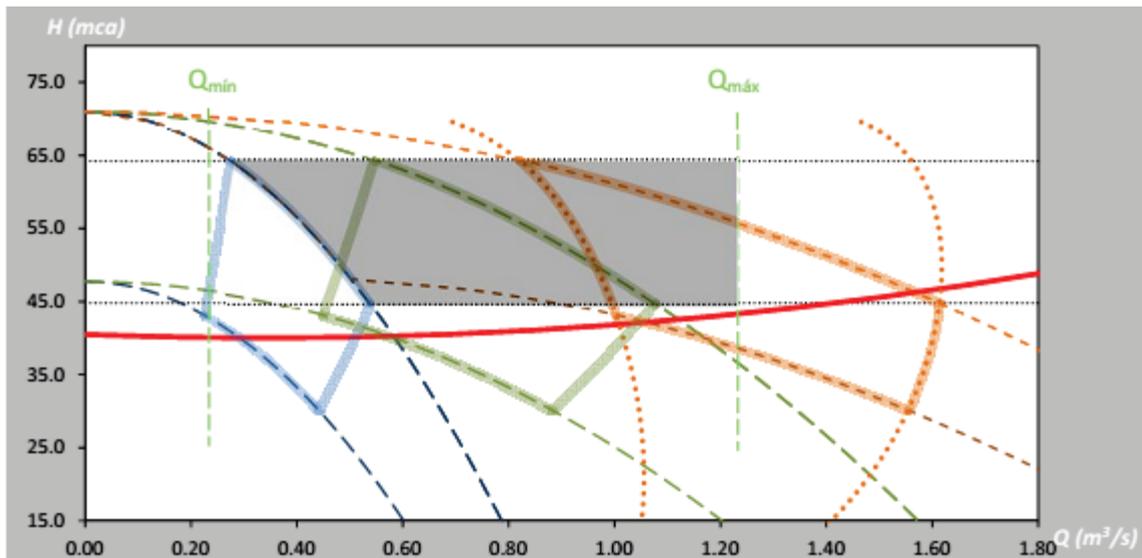
Cabe destacar que, para el escenario planteado, es posible salvar estas zonas sin cobertura aprovechando, por ejemplo, la posibilidad de poner las *BVV* en sobrevelocidad, ya que el crecimiento de las zonas útiles debido a esta circunstancia se produce por donde la curva de consigna sale de cada zona útil. Lo explicado se puede observar en la FIGURA 25. Queda coloreada el área de zona útil ganada, en cada una, para un  $\alpha_{m\acute{a}x} = 1'15$ .



**FIGURA 23: ESCENARIO NO ADECUADO 1 CON SOBREVELOCIDAD**

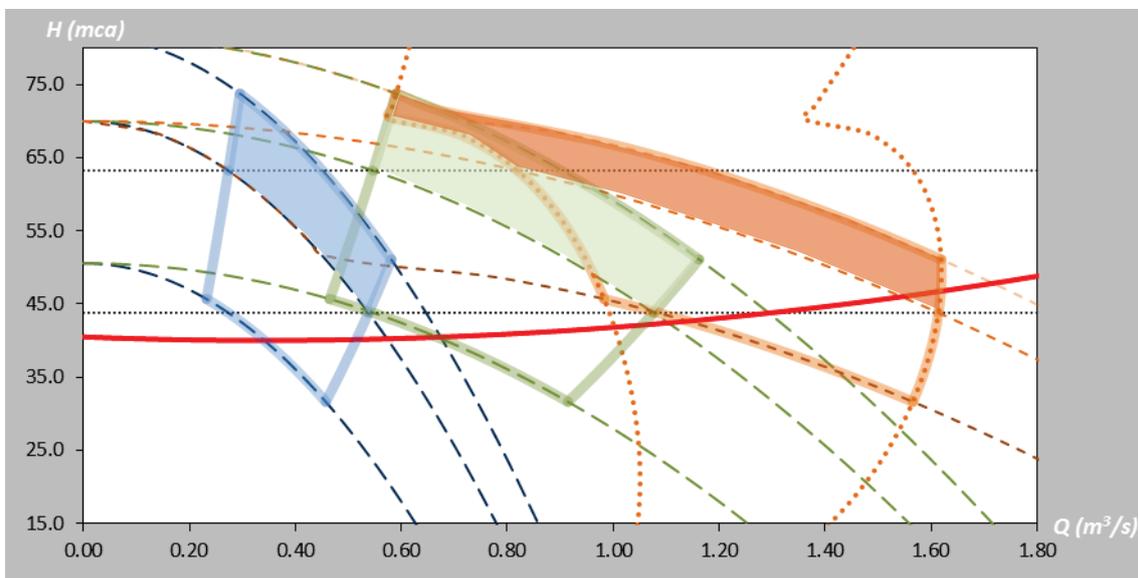
En la FIGURA 24 se plantea el segundo escenario. Se simulan bombas con mas altura y se acepta un  $\eta_{min} = 0'77$ . Estudiando la situación expuesta se deduce que:

- La cobertura de la curva de consigna es menor, como también ocurre en el caso anterior. Efectivamente, si la estudiamos con mayor atención, se observan zonas sin cobertura para los caudales cercanos a  $0'3 \left(\frac{m^3}{s}\right)$ , a  $0'6 \left(\frac{m^3}{s}\right)$  y a  $1'15 \left(\frac{m^3}{s}\right)$ . Esta situación implica que para un caudal demandado incluido en las zonas sin cobertura, no se cumplirá la condición de rendimiento aceptable.
- La mayoría de la curva de consigna transcurre en zona de rendimiento no aceptable para la *BVF* (sombreado).



**FIGURA 24: ESCENARIO NO ADECUADO 2**

Además, para el escenario planteado, no es posible salvar estas zonas sin cobertura aprovechando, como en el caso anterior, la posibilidad de poner las BVV en sobrevelocidad, ya que el crecimiento de las zonas útiles debido a esta circunstancia no se produce por donde la curva de consigna sale de cada zona útil. Véase la FIGURA 25. Queda coloreada el área de zona útil ganada, en cada una para un  $\alpha_{m\acute{a}x} = 1'08$ .



**FIGURA 25: ESCENARIO NO ADECUADO 2 CON SOBREVELOCIDAD**

### 2.2.13 INTERSECCIÓN ENTRE ZONAS ÚTILES Y CURVA DE CONSIGNA

El modelo resuelve analíticamente las intersecciones de forma paralela a la visualización de la curva de consigna superpuesta sobre el apilamiento de zonas útiles. Esto es necesario para poder cuantificar los indicadores que sirven para comparar los distintos escenarios estudiados.

Para cada asociación, el modelo resuelve las intersecciones de cada zona útil con la curva de consigna.

Primero calcula las cuatro posibles intersecciones entre la zona útil de la asociación en cuestión igualando cada una de las expresiones que define la zona útil con la curva de consigna. De esta forma las cuatro igualdades a resolver serán:

- $C. Consigna = C_m(\alpha_{m\acute{a}x})$
- $C. Consigna = C_m(\alpha_{m\acute{m}n})$
- $C. Consigna = \text{Parábola Isorrendimiento } (K_1)$
- $C. Consigna = \text{Parábola Isorrendimiento } (K_2)$

Después, el modelo elegirá qué intersecciones son reales y cuáles son ficticias mostrando las primeras como resultado para continuar con los cálculos.

## 2.3 INDICADORES DE COBERTURA DE LA CURVA DE CONSIGNA

Para poder sintetizar cómo y en qué medida se consigue cubrir las necesidades que plantea el sistema hidráulico, expresadas por la Curva de Consigna, se han implementado dos indicadores cuyos valores serán resueltos y mostrados, en cada caso, por el modelo.

### 2.3.1 COBERTURA

Este indicador pretende cuantificar la proporción de caudales de la Curva de Consigna que quedan cubiertos por el apilamiento de las zonas útiles. Se expresará en % y se corresponde con la siguiente expresión:

$$C = \sum_{i=1}^m \frac{Q_i^A - Q_i^B - R_i}{Q_{M\acute{a}x} - Q_{M\acute{m}n}} \cdot 100$$

Donde: “i” expresa el número de orden de la asociación de bombas en estudio en relación a su orden predeterminado (orden de arranque) y puede tomar valores desde 1 hasta “m”, siendo

“ $m$ ” el número total de asociaciones posibles planteadas. “ $Q_i^A$ ” expresa el caudal donde se produce la intersección de entrada de la Curva de Consigna a la Zona Útil de la asociación “ $i$ ” en cuestión. “ $Q_i^B$ ” expresa el caudal donde se produce la intersección de salida de la Curva de Consigna a la Zona Útil de la asociación “ $i$ ” en cuestión. “ $R_i$ ” expresa el recubrimiento producido por la zona útil “ $i$ ” y la zona útil “ $i - 1$ ”, si este existe. “ $Q_{Máx}$ ” y “ $Q_{Mín}$ ” expresan los límites que puede tomar el Caudal Demandado “ $Q_D$ ”.

A través de la FIGURA 26 se define gráficamente el concepto de cobertura. Obsérvese que, en este ejemplo el apilamiento de zonas útiles cubre, el 100% del tramo de Curva de Consigna desde “ $Q_{Mín}$ ” hasta “ $Q_{Máx}$ ”.

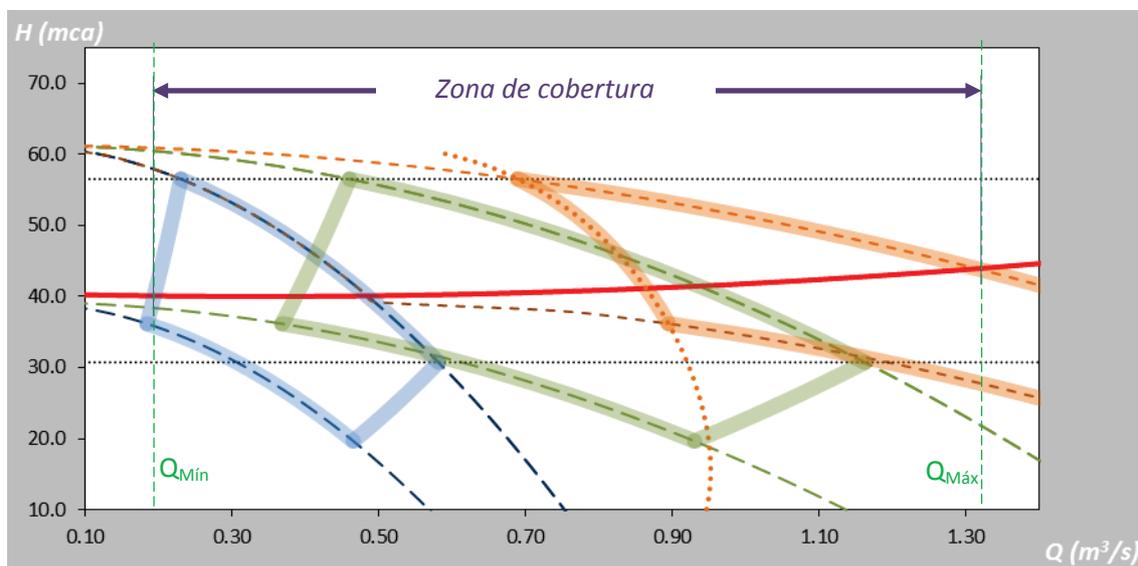


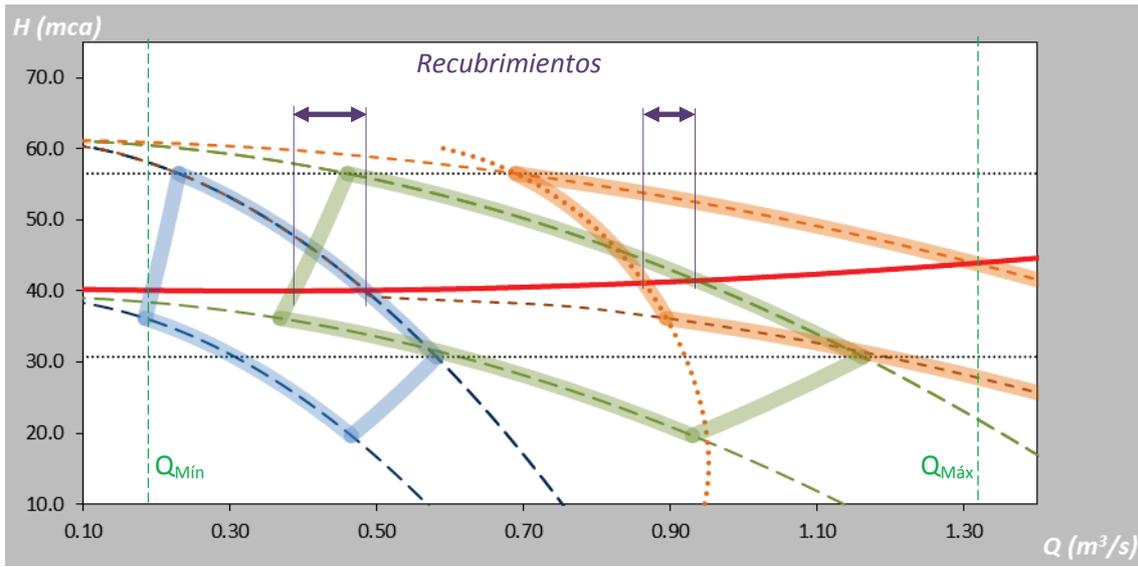
FIGURA 26: ZONA DE RECUBRIMIENTO

### 2.3.2 RECUBRIMIENTO ACUMULADO

Este indicador pretende cuantificar la proporción de caudales de la curva de consigna que quedan cubiertos por dos zonas útiles de asociaciones consecutivas según el orden predeterminado (orden de arranque). Se expresará en % y se corresponde con la siguiente expresión:

$$R_{Acum} = \sum_{i=1}^m \frac{R_i}{Q_{Máx} - Q_{Mín}} \cdot 100$$

Se señala, en la FIGURA 27, las áreas de intersección (recubrimientos) entre las zonas útiles de las posibles asociaciones del equipo de bombeo. La suma de la proyección en el eje horizontal de estas áreas es lo que se define como recubrimiento acumulado. De la misma forma que se ha explicado en la FIGURA 21, se debe entender que es esta condición la que facilita, en gran medida, el cambio de asociación (paro o arranque de una bomba) durante el funcionamiento normal del equipo de bombeo.



**FIGURA 27: SOLAPE ACUMULADO.**



***CAPÍTULO***

---

***3. MODELO ENERGÉTICO ECONÓMICO***



## 3.1 INTRODUCCIÓN

El modelo anterior será utilizado por el usuario de forma reiterada, simulando tantos escenarios como considere oportunos, descartando los que devuelvan resultados no satisfactorios hasta decidir seguir adelante con las alternativas que considere más adecuadas, bien por sus valores de Recubrimiento y Solape Acumulado, bien por el aspecto que presenta la visualización del escenario o bien por ambas razones.

De cualquier forma, una vez desechadas las alternativas consideradas como no adecuadas, el estudio no acaba aquí, ya que elegir una de las alternativas que se sostienen, con los datos logrados hasta el momento, podría no ser la mejor opción. Se ha de entender que, tanto en la visualización del apilamiento de zonas útiles como el cálculo del recubrimiento y del solape acumulado, son características generales del escenario en cuestión, esto es, dichos resultados nos describen como es el entorno de ese escenario en el espacio "HQ" y de qué forma se superpone a la curva de consigna. Pero la realidad de un sistema hidráulico es más profunda. La calificación de Variable Aleatoria que le damos al Caudal Demandado complica el estudio y obliga a realizar una segunda simulación, esta vez con datos reales (si existen) o estimados (resultado de simulaciones con modelo matemático de la red) consiguiendo una aproximación razonable del gasto energético y de la repercusión económica de éste.

Este modelo de simulación se diseña bajo la realidad de facturación energética en España a fecha de este trabajo. Concretamente se plantea para tipos de contrato compuestos de 6 periodos tarifarios y con datos pertenecientes a la zona I (península).

## 3.2 TARIFAS ELÉCTRICAS

### 3.2.1 CONCEPTOS PAGADOS EN UNA FACTURA ELÉCTRICA

#### 3.2.1.1 CONCEPTOS DE FACTURA BÁSICA

- Pagos por consumo: Es un término variable y se paga a la compañía comercializadora.
- Pagos por acceso a red: Es un término con una parte variable y otra fija. Este concepto se debe entender como un "peaje" a pagar a la compañía distribuidora por el uso de la red y generalmente se le denomina tarifa de acceso. Incluye:
  - Pagos por energía.
  - Pagos por potencia contratada.
  - Pagos por exceso de potencia.

- Pagos por energía reactiva.
- Pagos por alquiler de equipos de medida: Es un término fijo y se paga a la compañía distribuidora.
- Impuestos: Se pagan al estado. Fundamentalmente:
  - Impuesto eléctrico (IE).
  - Impuesto sobre el valor añadido (IVA).

### 3.2.1.2 OTROS CONCEPTOS

Estos conceptos se cobran por prestación de servicios:

- Derechos de acometida: Fundamentalmente por petición de aumento de potencia contratada.
- Derechos de supervisión, enganche y verificación: Por actuaciones en la instalación.

### 3.2.2 TIPOS DE CONTRATO

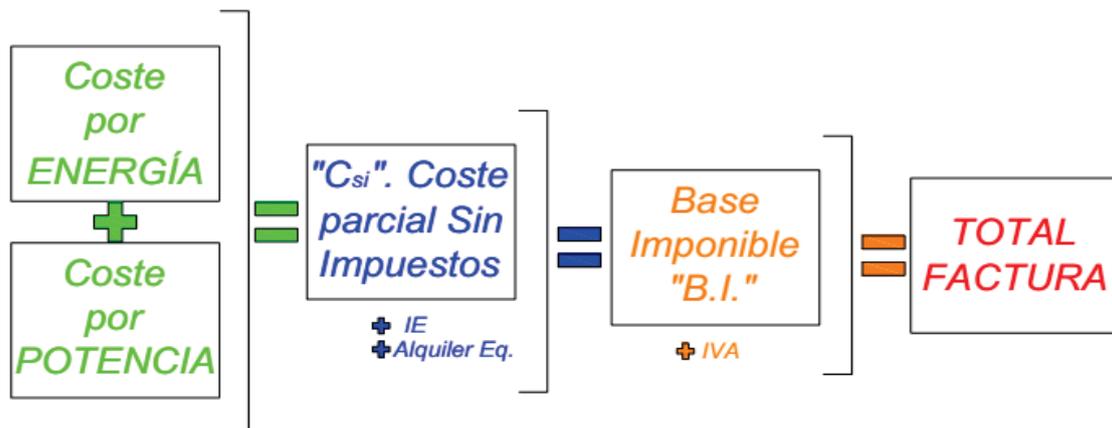
Existen dos posibilidades: Tarifa regulada y mercado regularizado.

#### 3.2.2.1 TARIFA REGULADA

Conocida como tarifa de último recurso (TUR). Características:

- Válida para pequeños consumidores (potencia menor o igual a 10 kw).
- Tarifa ofrecida por las comercializadoras de último recurso.
- Los precios son iguales para todo el territorio español (independientes de la comercializadora elegida).

Se muestra en la FIGURA 28 la estructura de pago de este tipo de tarifa.



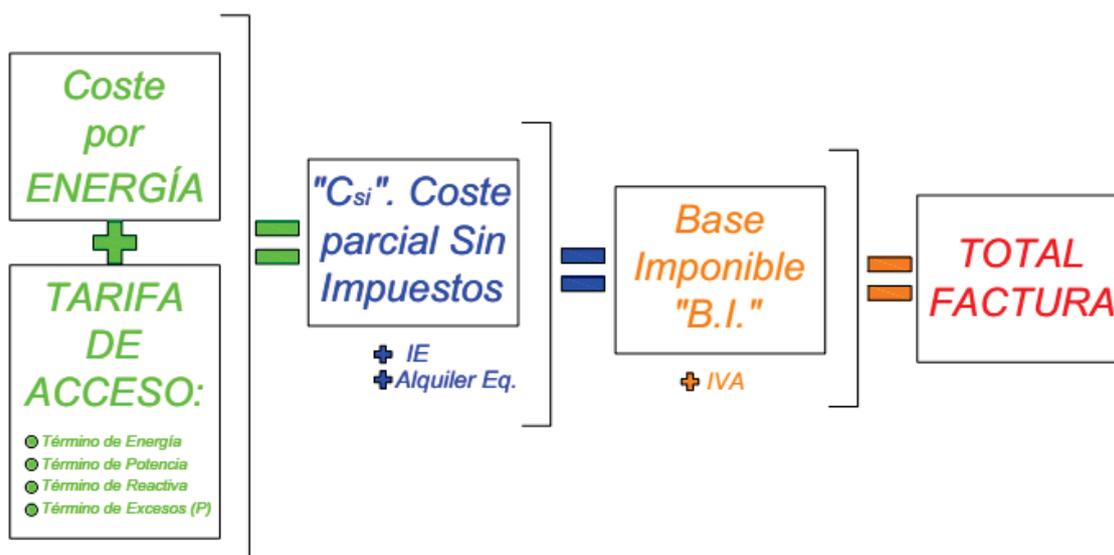
**FIGURA 28: ESTRUCTURA DE PAGO EN TARIFA REGULADA.**

### 3.2.2.2 MERCADO LIBERALIZADO

Características:

- Válido para todos los consumidores.
- Los precios de energía son libremente pactados entre comercializadora y cliente.
- Acceso a red de distribución mediante tarifa de acceso con precios regulados.

Se muestra en la FIGURA 29 la estructura de pago de este tipo de tarifa.



*FIGURA 29: ESTRUCTURA DE PAGO EN MERCADO LIBERALIZADO*

### 3.2.3 LEGISLACIÓN APLICABLE

- ITC 1659/2009: Estructura de la tarifa de último recurso.
- Resolución de 26/06/2009 de la SEE: Bono Social.
- RD 647/2011: Creación de la tarifa supervalle.
- RD 1164/2001: Definición de las tarifas de acceso.
- ITC 2794/2007: Periodos de las tarifas de acceso, salvo 3.1A.
- ITC 3801/2008: Periodos de la tarifas de acceso 3.1A.

### 3.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS EXIGENCIAS DE SIMULACIÓN

#### 3.3.1 CALENDARIO ANUAL IMPLEMENTADO

Para realizar la simulación el modelo tiene implementado un año de Caudales Demandados horarios. El incremento de tiempo se ha elegido horario debido a que los datos adquiridos para realizar el ejemplo práctico son horarios.

El Calendario implementado distingue:

- Horas del día.
- Días de la semana (de Lunes a Domingo).
- Días de mes (según mes de 1 a 30, de 1 a 31 o de 1 a 28).
- Festivos (introducidos por el usuario).
- Meses del año.

De esta forma, tendremos asociada toda esta información a cada Caudal Horario Demandado. Por ejemplo, la hora 0 (de 0:00 h a 1:00 h) del día 1 Lunes, del mes Enero que es festivo.

#### 3.3.2 INPUTS DEL MODELO

##### 3.3.2.1 Caudales Demandados

Es el input principal de este modelo. Tal como se ha explicado, se introducirán horarios.

No es objeto de este trabajo estudiar, valorar y en su caso tratar los errores asociados a las series de Caudales Demandados. Cualquier tratamiento que se considere como necesario (por ejemplo eliminación de caudales negativos) deberá efectuarse, por parte del usuario, con antelación al uso del modelo.

##### 3.3.2.2 Caudales de Consigna

Cuando el usuario termina de simular con el modelo de visualización, debe elegir los caudales de consigna. Estos valores son el inicio y la esencia del futuro sistema de regulación, ya que marcan los arranques y paros de las bombas o, explicado de otra forma, cuándo dejamos de utilizar la asociación “ $i$ ” para utilizar la asociación “ $i + 1$ ” o al revés.

El input se introducirá en formato de matriz, de “ $i + 1$ ” filas y cuatro columnas, la primera contendrá los Caudales de Consigna, la segunda, tercera y cuarta incluirán respectivamente el número total de Bombas “ $n_T$ ”, el número total de  $BVV$  “ $n_V$ ”, y el número total de  $BVF$  “ $n_F$ ”

que funcionen para caudales contenidos entre ese caudal de consigna y el siguiente. De esta forma, cada caudal de consigna tiene definida, de forma implícita, la asociación de bombas que funcionará entre él y el siguiente caudal.

### 3.3.2.3 Otros parámetros necesarios

Una vez explicados los inputs, el usuario también debe introducir otros parámetros que caracterizan el escenario en cuestión. Estos son:

- Rendimiento del motor eléctrico.
- Tarifa de Alquiler de Equipo de Medida Eléctrica.
- Relación de días festivos en el año a estudiar.
- Tarifa por Energía para cada periodo (matriz).
- Tarifa por potencia para cada periodo (matriz).
- Asignación horaria de los periodos contratados según mes (legislado según zona geográfica. Formato matriz).
- IVA.
- IE.

### 3.3.3 CALCULO DEL RENDIMIENTO BVF Y DEL RENDIMIENTO BVV

Para cada Caudal Horario Demandado " $Q_{D,i}$ ", el modelo calcula " $n_T$ " (número total de bombas), " $n_F$ " (número de *BVF*) y " $n_V$ " (número de *BVV*) gracias a las consignas implementadas. Después, separa la parte de este caudal que se bombea mediante *BVF* y la parte que se bombea mediante *BVV*. Llegados a este punto, el modelo calcula el rendimiento de las *BVF* mediante la siguiente expresión:

$$\eta(Q_{D,i}^F)_i = D \cdot \frac{Q_{D,i}^F}{n_{F,i}} - E \cdot \left( \frac{Q_{D,i}^F}{n_{F,i}} \right)^2$$

Y el de las *BVV* mediante la expresión:

$$\eta(Q_{D,i}^V)_i = D \cdot \frac{Q_{D,i}^V}{\alpha \cdot n_{V,i}} - E \cdot \left( \frac{Q_{D,i}^V}{\alpha \cdot n_{V,i}} \right)^2$$

Al usar estas expresiones se acepta que todas las bombas referidas en cada expresión tienen un funcionamiento similar y, por tanto, el mismo rendimiento. Siendo así, si se quisiera estudiar el rendimiento real de cada bomba por separado, se deberían obtener datos

individuales del caudal que trasiega cada bomba así como de la presión que da, cada una de ellas, en impulsión.

### 3.3.4 MODIFICACIÓN DEL RENDIMIENTO POR SARBU-BORZA

Tal como se ha explicado anteriormente, en la realidad, el rendimiento definido por las leyes de semejanza debe ser afectado por la expresión de Sarbu-Borza, en determinados casos. Esto es:

$$\eta_{SB} = 1 - (1 - \eta) \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{0,1} = 1 - (1 - \eta_{AF})\alpha^{-0,1}$$

Donde " $\eta_{SB}$ " es el rendimiento modificado, " $\eta_{AF}$ " es el rendimiento definido por las leyes de semejanza y " $\alpha$ " la relación de velocidades " $N_1/N_2$ ".

El modelo incluye la posibilidad de activar la modificación descrita a decisión del usuario. De esta forma se puede también estudiar el efecto que tiene un mismo escenario incluyendo, o no, esta opción.

### 3.3.5 CÁLCULO DE LA POTENCIA DE BVF Y LA POTENCIA DE BVV

Una vez personalizado el escenario en estudio, como ya se ha comentado, el modelo calcula por un lado, para cada Caudal Horario Demandado " $Q_{D,i}$ " la correspondiente Altura " $H_{CC,i}$ " según la Curva de Consigna implementada, y por otro lado, divide ese " $Q_{D,i}$ " en " $Q_{D,i}^F$ " y " $Q_{D,i}^V$ ".

Conocida la parte fija y la parte variable de cada " $Q_{D,i}$ ", conocida la altura " $H_{CC,i}$ " y el rendimiento fijo horario " $\eta_i^F$ ", el modelo resuelve la potencia de la parte fija de la asociación " $P_i^F$ " mediante la siguiente expresión:

$$P_i^F = \frac{\gamma \cdot Q_{D,i}^F \cdot H_{CC,i}}{\eta_i^F}$$

Y la potencia de la parte variable de la asociación " $P_i^V$ " mediante la siguiente expresión:

$$P_i^V = \frac{\gamma \cdot Q_{D,i}^V \cdot H_{CC,i}}{\eta_i^V}$$

La Potencia Absorbida total " $P_i^T$ " será la suma de la Potencia Fija " $P_i^F$ " y la Potencia Variable " $P_i^V$ ". Esto es:

$$P_i^T = P_i^F + P_i^V$$

Conocida la Potencia Absorbida total " $P_i^T$ " debemos afectarla por el rendimiento eléctrico para hallar la Potencia eléctrica:

$$P_{E,i} = \frac{P_i}{\eta_{ME}}$$

### 3.3.6 CÁLCULO DE LA ENERGÍA

Conocida la Potencia Eléctrica y conocido el intervalo de tiempo considerado ( $\Delta t_i$ ), generalmente una hora, podemos hallar la cantidad de energía en " $Kw \cdot h$ " consumida en el citado intervalo, mediante la expresión siguiente:

$$E_{Ei} = P_{E,i} \cdot \Delta t_i$$

Siendo " $\Delta t_i$ " el intervalo de tiempo planteado.

### 3.3.7 CALCULO DEL COSTE POR ENERGÍA

Una vez se obtiene la energía, el coste debido a ella lo obtendremos multiplicando el valor de energía por el precio de la misma. Esto es:

$$\text{Coste Anual por Energía} \left( \frac{\text{€}}{\text{año}} \right) = \sum_i^n E_{E,i} \cdot t_i^E$$

Siendo " $E_i$ " la energía consumida para cada horario demandado y " $t_i^E$ " la tarifa para esa energía según el periodo de tarificación al que pertenece.

### 3.3.8 CÁLCULO DEL COSTE POR POTENCIA

El coste por término de potencia va a depender de la potencia que se tenga contratada con la compañía, que puede ser diferente en cada periodo horario de tarificación. Si se optimiza a fondo este punto de contratación, la potencia contratada en cada periodo horario de tarificación será aquella que haga mínimo el pago total compuesto por el pago por potencia contratada y el pago por excesos de potencia utilizada si los hubiere. La información sobre el coste de estos excesos de potencia consumida respecto de la contratada se pueden obtener de la compañía eléctrica.

De esta forma, dado que en cada periodo tarifario la potencia puede oscilar en el caso de una red de riego, en función de la demanda de caudal existente, es evidente que contratar el 100 % de la potencia (es decir, a máxima) no resultará rentable (el coste de los excesos debería ser desmesurado para que fuera rentable). Por lo tanto, en cada periodo tarifario, el óptimo de

potencia contratada siempre será menor al máximo de potencia necesaria en la instalación. Sin ánimo de eximir un estudio detallado de la cuestión y debido a que no se dispone del coste de dichos excesos se propone, como aproximación, establecer que la potencia óptima contratada sea un 80% de la potencia eléctrica máxima total observada en cada periodo.

De esta forma el precio por potencia será:

$$\text{Coste Anual por Potencia} \left( \frac{\text{€}}{\text{año}} \right) = \sum_i^n P_{C,i} \cdot T_i^P$$

Siendo " $P_{C,i}$ " la potencia contratada para cada periodo tarifario y " $T_i^P$ " la tarifa para esa potencia y periodo.

### 3.3.9 OTROS COSTES

En este apartado se debería tener en cuenta todos aquellos costes no vinculados de la energía o de la potencia eléctrica.

En este caso, se tiene en cuenta:

- El alquiler del equipo de medida.
- El impuesto eléctrico "IE".
- El impuesto sobre el valor añadido "IVA".

## 3.4 RESULTADO FINAL DEL ESCENARIO

El resultado final del escenario en cuestión queda dispuesto por el modelo de la siguiente manera:

<b><math>C_{SI}</math> (€/AÑO)=</b>	<b>84158.13</b>
IE=	4093.45
Alquiler EqM=	975.00
<b>B.I. (€/año)=</b>	<b>89226.58</b>
IVA(16%)=	14276.25
<b>Total Fact. (€/AÑO)=</b>	<b>103502.83</b>

**TABLA 1: RESULTADO ECONÓMICO**

Donde " $C_{SI}$ " es el Coste Parcial Sin Impuestos y "B. I." es la Base Imponible. El resultado se presenta como Total Facturado en euros por año.

### 3.5 RESUMEN DE RESULTADOS

Una vez acabados todos los eslabones que conforman el procedimiento de cálculo, tanto en el modelo hidráulico, como en el presente modelo energético económico, se plantea el siguiente resumen de resultados.

	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3
	<b>3V+5F</b>	<b>2V+6F</b>	<b>1V+7F</b>
NºBVV	3	2	1
NºBVF	5	6	7
NºB (TOTAL)	8	8	8
ALFA MÍN	0.80	0.80	0.80
ALFA MÁX	1.00	1.00	1.00
RECUBRIMIENTO	<b>98.89%</b>	<b>94.25%</b>	<b>53.84%</b>
SOLAPE ACUMULADO	<b>45.86%</b>	<b>12.42%</b>	<b>0.00%</b>
TOTAL FACTURADO (€/AÑO)	<b>103,067.99</b>	<b>103,337.27</b>	<b>103,502.83</b>
OBSERVACIONES	Regulación Compartida	Regulación Compartida	

**TABLA 2: RESUMEN DE RESULTADOS**

En la figura se muestran los resultados obtenidos para un equipo de bombeo para el cual se proponen tres posibles escenarios. Para cada uno de ellos, se expresan los datos más relevantes y se muestran los resultados (en negrita) obtenidos mediante las simulaciones de los dos modelos explicados.



***CAPÍTULO***

---

***4. APLICACIÓN DE LOS MODELOS A UNA RED  
DE RIEGO***



## 4.1 INTRODUCCIÓN

Una vez explicado el Modelo de visualización Hidráulica y el Modelo Energético Económico, se propone su uso completo en un equipo de bombeo existente.

## 4.2 DESCRIPCIÓN DE LA RED DE RIEGO

### 4.2.1 ENTORNO GEOGRÁFICO

Ubicada en la zona centro oeste de la península ibérica, la red de riego se sitúa en la provincia de Badajoz, Comunidad de Extremadura. Perteneciente a la Cuenca Hidrográfica del Guadiana.



**FIGURA 30: CUENCA HIDROGRÁFICA DEL GUADIANA**

### 4.2.2 ABASTECIMIENTO DE LA RED

La red queda abastecida desde:

- Embalse de la Serena: Con capacidad de 3.219 ( $Hm^3$ ).
- Embalse del Zújar: Con capacidad de 309 ( $Hm^3$ ).



**FIGURA 31: EMBALSE DE LA SERENA Y DEL ZUJAR.**

### 4.2.3 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL ÁREA DOTADA DE RIEGO

- Superficie total de 21.141 (Ha).
- Diez sectores hidráulicos

### 4.2.4 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA RED DE RIEGO

- Sistema de funcionamiento a la demanda.
- 62 grupos de bombeo instalados.
- Potencia eléctrica total instalada de 26.750 (KVA), suministrada por dos líneas eléctricas de 45(KV) con 10 subestaciones instaladas.
- Consumo de energía eléctrica anual del orden de 23 – 25 (Gwh).



**FIGURA 32: ABASTECIMIENTO ELÉCTRICO**

#### 4.2.4.1 RED DE TUBERÍAS

El agua, a cada una de las parcelas, se reparte mediante una red de tuberías principales, secundarias y terciarias que finalizan en los hidrantes de servicio de cada parcela. En la actualidad, la longitud total aproximada es de 1100 km. El material utilizado va desde tuberías de Hormigón, Fundición, Fibrocemento, PVC, PE, etc.



**FIGURA 33: RED DE TUBERÍAS**

#### 4.2.4.2 SECTOR DE ESTUDIO

En la FIGURA 34 se observa representada la red. El sector hidráulico en cuestión, cuenta con una superficie de 1028 (Ha).



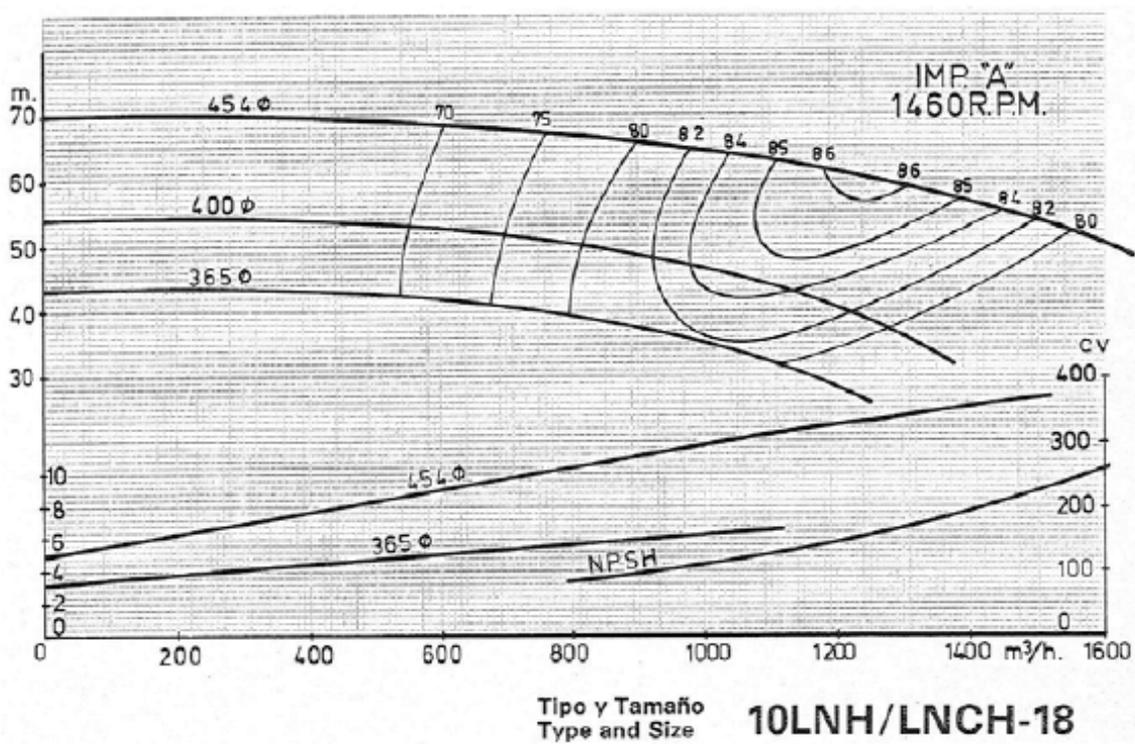
**FIGURA 34: RED REPRESENTADA MEDIANTE EPANET SOBRE EL SECTOR HIDRÁULICO**

El número total de bombas instaladas para el sector hidráulico en estudio es de 8 y son del tipo "10 LN<sub>H</sub>/LN<sub>CH</sub> – 18". Instaladas en paralelo, tal como se muestra en la fotografía.



**FIGURA 35: EQUIPO DE BOMBEO INSTALADO**

Las curvas de fabricante del tipo de bomba instalada presentan el siguiente aspecto:



**FIGURA 36: CURVAS DE FABRICANTE DE LA BOMBA MODELO 10LNH/LNCH-18**

### 4.3 REGISTRO DE CAUDALES

Es importante entender que para poder realizar el estudio energético mediante el modelo explicado en el capítulo 3, es necesario tener la serie de caudales horarios demandados para un determinado periodo. En nuestro caso contamos con un año de registros correspondientes al caudal horario inyectado en la red de riego, así como los puntos con consumo para cada uno de los periodos. Si no existiesen registros se tendría que realizar una estimación.

### 4.4 CURVA DE CONSIGNA

Como ya se ha comentado, para el presente estudio, es necesario disponer, o en su caso, elaborar la curva de consigna de la instalación.

Para ello, es necesario disponer del modelo matemático que caracteriza al sistema hidráulico implementado éste en cualquier programa de simulación, por ejemplo EPANET. De forma complementaria, se debe contar con la serie de caudales demandados por cada uno de los puntos de consumo para el periodo de estudio, esta serie permitirá hacer la carga hidráulica del modelo y la posterior simulación.

Mediante el modelo convenientemente cargado, e impuesta una presión mínima en los puntos de consumo, se calcula la altura mínima necesaria en cabecera para satisfacer la demanda en las condiciones requeridas. Esta operación se repetiría recorriendo todos los caudales entre el caudal mínimo y el caudal máximo fijados, hasta tener suficientes puntos para definir el aspecto de la curva en el plano "HQ".

Llegados a este punto, solo tenemos que realizar el mejor ajuste posible (normalmente parabólico) y se consigue la expresión de la curva en cuestión. En los sistemas de riego a la demanda, no se puede hablar de una única curva de consigna. No todos los puntos de consumos demandan en cada momento en la misma proporción. Al poder variar la composición de ese caudal (como suma de los diferentes puntos de consumo que demandan), variará irremediablemente las pérdidas de carga (que dependen de la distancia hasta los puntos de consumo que demanden y del caudal que se trasiega). Siendo así, la obtención de una única curva de consigna no es posible. Es decir, un mismo caudal puede precisar diferentes alturas de consigna en función de la localización de los consumos. Por ello, la serie de consignas para cada caudal forma una nube de consigna (área HQ en la que se localizan todas las curvas o puntos de consigna).

A partir de esta nube de consigna, es posible construir dos curvas extremas que delimiten el área que contiene los puntos de consigna. De esta forma tendremos una franja que converge hacia el punto de máximo caudal, donde la altura es única ya que en esta situación, todos los puntos de consumo demandan el máximo caudal (ver FIGURA 37).

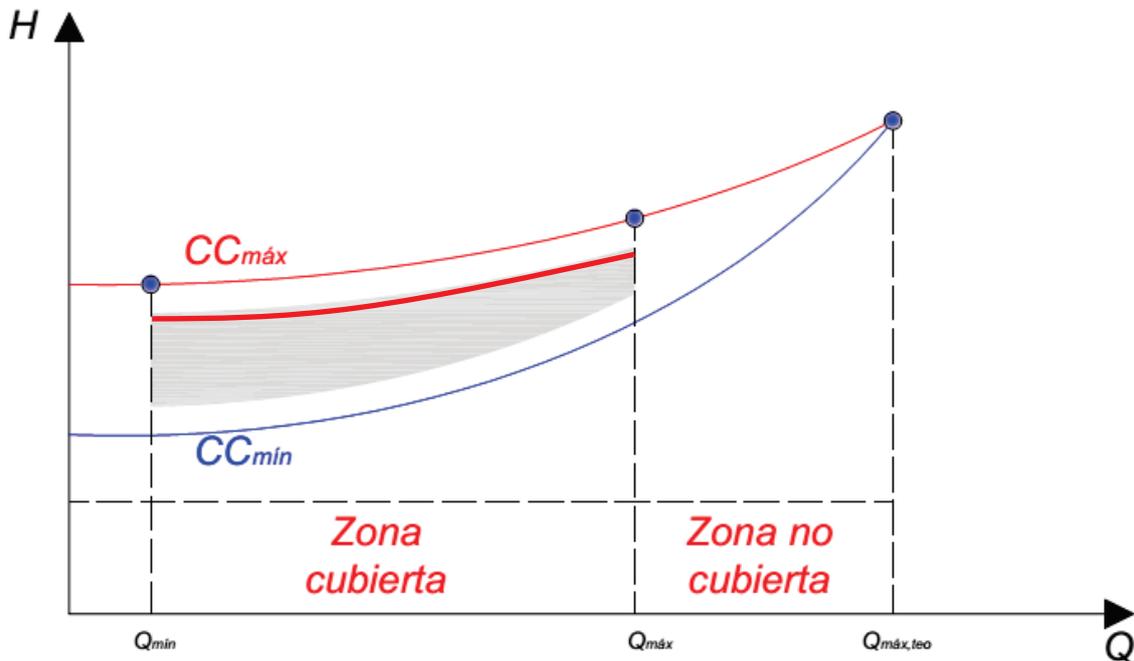


FIGURA 37: CURVA DE CONSIGNA PARA UN SISTEMA DE RIEGO A LA DEMANDA

Si bien el máximo caudal teórico es éste, normalmente no se elige como caudal máximo, ya que es una combinación de caudales poco probable que encarece en extremo la instalación. Se suele reducir este valor quedando cubiertos, de forma razonable, los caudales más usuales.

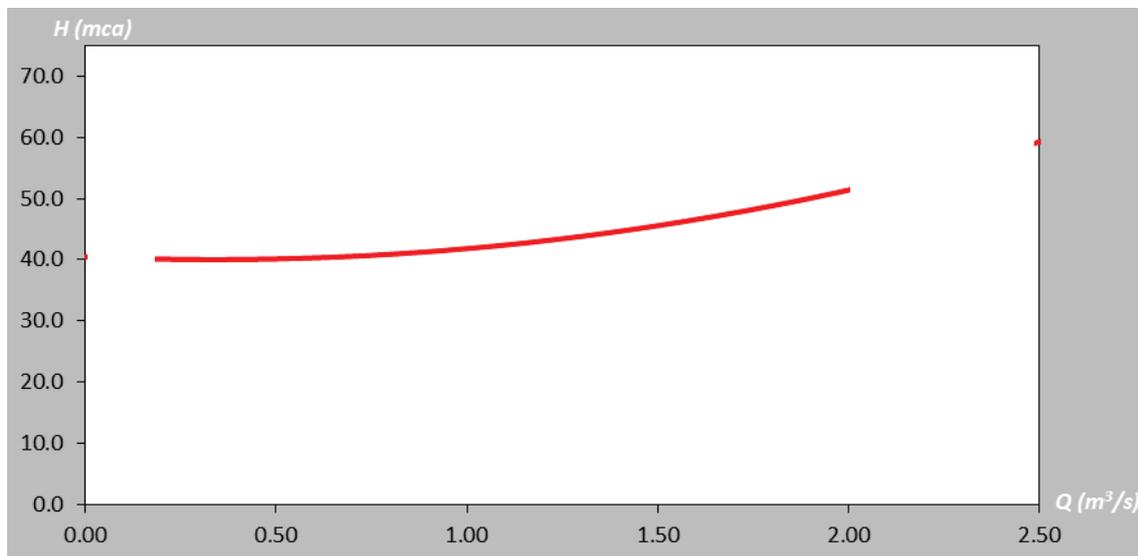
Para los caudales bajos pasa lo mismo, son poco probables, esporádicos y (según el caso) quizá se solucionen de otra forma (con una bomba más pequeña, etc.). Es por esto que se impone un caudal mínimo por debajo del cual no se tienen en cuenta los caudales.

Lo mismo pasa en el área que nos queda, con poca frecuencia los valores se hacen extremos acercándose, para cada caudal, a la curva de consigna máxima o mínima dibujadas. Es decir, si dibujáramos la serie de caudales con sus respectivas alturas, la mayoría de los puntos caerían en una zona intermedia (sombreado en la f).

Con todo ello, la curva de consigna con la se decide trabajar es la más desfavorable de las incluidas en la zona sombreada (límite superior de la nube de consigna), es decir la curva que incluya todos los puntos de consigna obtenidos en las simulaciones (línea roja que limita la nube de puntos).

En nuestro caso, se presenta la curva de consigna máxima resultante, en la FIGURA 38, que habrá que tomar como premisa, siendo su expresión:

$$H_{CC} = 40'5 - 2'8 \cdot Q + 4'1 \cdot Q^2$$



**FIGURA 38: CURVA DE CONSIGNA DE LA RED DE RIEGO**

#### 4.5 ELECCIÓN DE ESCENARIOS

En el caso de estudio que nos ocupa, se reduce mucho el número de escenarios posibles, ya que tanto el tipo, como el número de bombas vienen impuestos. Siendo así, reducimos los escenarios a la incorporación de variadores de velocidad. Se intenta simular qué hubiera pasado si la serie de caudales obtenida, se hubiesen bombeado en los escenarios seleccionados. De esta forma, se proponen 3 escenarios a estudiar:

- Escenario 1: Compuesto por  $3 \times BVV$  y  $5 \times BVF$ . Con regulación compartida para las  $BVV$  y una relación máxima de velocidad de  $\alpha_{m\acute{a}x} = 1$ , es decir, no se permite sobrevelocidad.
- Escenario 1: Compuesto por  $2 \times BVV$  y  $6 \times BVF$ . Con regulación compartida para las  $BVV$  y una relación máxima de velocidad de  $\alpha_{m\acute{a}x} = 1$ , es decir, no se permite sobrevelocidad.
- Escenario 1: Compuesto por  $1 \times BVV$  y  $7 \times BVF$ . Con una relación máxima de velocidad de  $\alpha_{m\acute{a}x} = 1'15$ .

## 4.6 SIMULACIÓN DE LOS ESCENARIOS ELEGIDOS

Para la simulación energética se ha seguido el procedimiento comentado en el capítulo 3, dado que se dispone de la serie temporal de caudales consumidos por la red para un año de funcionamiento " $Q(t)$ " con intervalo temporal horario.

Como se ha comentado en el apartado 3.3.8, por no disponer del coste del exceso de potencia, se ha estimado la potencia contratada en un 80% de la potencia máxima horaria consumida en cada periodo. Esta estimación se realiza para aproximar el valor al que sería el óptimo, ya que es evidente que este óptimo será menor al 100%. No obstante, sería necesario conocer el coste de los excesos de potencia para poder evaluar de una manera más exacta el coste energético anual. Este coste de los excesos de potencia debería ser añadido al coste calculado en los ejemplos que se presentan.

Los parámetros comunes a todos los escenarios son los siguientes:

- Parámetros de Curva Motriz:  $A = 61'3$ ,  $B = 0$  y  $C = -90'5$ .
- Parámetros de Curva de Rendimiento:  $D = 4'3$  y  $E = 5'2$ .
- Rendimiento mínimo:  $\eta_{\min} = 0'7$ .
- Relación de Velocidades mínima:  $\alpha_{\min} = 0'8$ .
- Parámetros de Curva de Consigna:  $G = 40'5$ ,  $J = -2'8$  y  $L = 4'1$ .
- Caudal Máximo:  $Q_{M\acute{a}x} = 2'2 \left(\frac{m^3}{s}\right)$
- Caudal Mínimo:  $Q_{M\acute{i}n} = 0'19 \left(\frac{m^3}{s}\right)$

### 4.6.1 ESCENARIO 3V+5F

Para este escenario, como ya se ha comentado, la  $\alpha_{m\acute{a}x} = 1$ . Por otro lado, cuando funcionen varias  $BVV$  lo harán en Regulación Compartida.

El orden de funcionamiento de asociaciones será:

- "1V": Funciona una  $BVV$ .
- "2V": Funcionan dos  $BVV$  en regulación compartida.
- "3V": Funcionan tres  $BVV$  en regulación compartida.
- "3V+1F": Funcionan tres  $BVV$  en regulación compartida y una  $BVF$ .
- "3V + 2F": Funcionan tres  $BVV$  en regulación compartida y dos  $BVF$ .
- "3V + 3F": Funcionan tres  $BVV$  en regulación compartida y tres  $BVF$ .

- "3V+4F": Funcionan tres BVV en regulación compartida y cuatro BVF.
- "3V + 5F": Funcionan tres BVV en regulación compartida y cinco BVF.

#### 4.6.1.1 SIMULACIÓN HIDRÁULICA (3V+5F)

La FIGURA 39 muestra el mapa de zonas útiles consecuencia de las asociaciones de este escenario. A nivel visual, estas son:

- La curva de consigna queda prácticamente cubierta.
- Existen amplias zonas de recubrimiento entre las asociaciones consecutivas.

Los resultados analíticos a efectos de cobertura de curva de consigna y recubrimiento acumulado son:

- Cobertura:  $C = 98'89\%$
- Recubrimiento acumulado:  $R_{Acum} = 45'89\%$

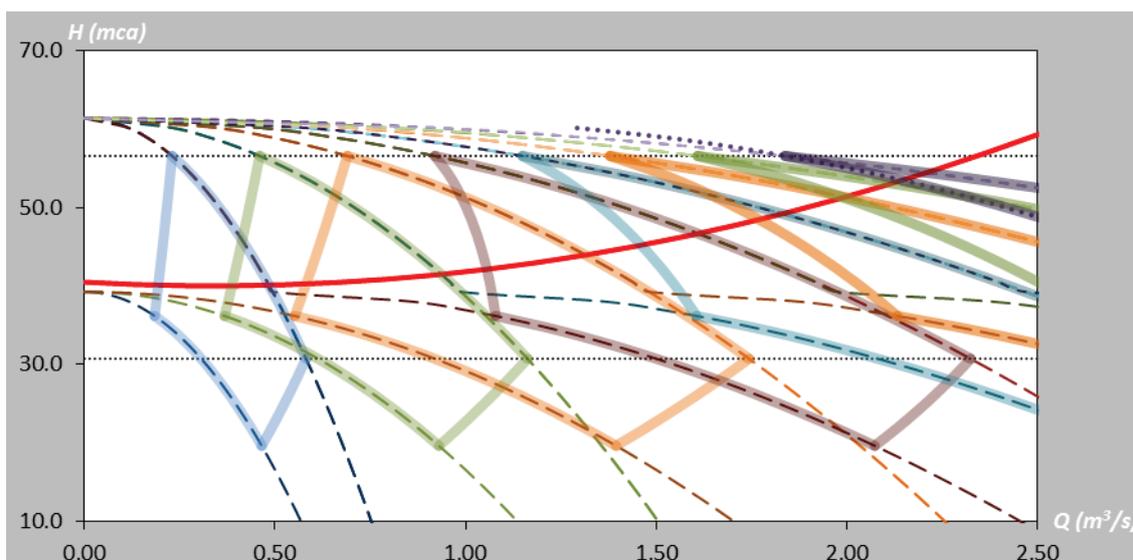


FIGURA 39: MAPA DE ZONAS ÚTILES PARA ESCENARIO 3V+5F

#### 4.6.1.2 SIMULACIÓN ENERGÉTICO ECONÓMICA (3V+5F)

En la Tabla 3 se muestra el resultado de la simulación energética económica:

<b>C<sub>SI</sub> (€/AÑO)=</b>	<b>154,438.93 €</b>
<b>IE=</b>	<b>7,511.91 €</b>
<b>Alquiler EqM=</b>	<b>975.00 €</b>
<b>B.I.(€/año)=</b>	<b>162,925.84 €</b>
<b>IVA(21%)=</b>	<b>34,214.43 €</b>
<b>Total Fact. (€/AÑO)</b>	<b>197,140.27 €</b>

TABLA 3: RESULTADO ENERGÉTICO-ECONÓMICO PARA EL ESCENARIO 3V+5F

En la Tabla 4 se muestra el desarrollo mensual de la energía utilizada en el bombeo y su repercusión económica:

Mes	Energía (Kwh)	Coste (€)
Enero	0.00	0.00
Febrero	0.00	0.00
Marzo	29294.10	1773.53
Abril	57674.80	3298.15
Mayo	122139.14	7048.71
Junio	277648.27	17381.63
Julio	630332.74	45438.73
Agosto	366183.46	19367.81
Septiembre	116607.76	6989.08
Octubre	76502.09	4348.34
Noviembre	102.07	5.40
<b>Totales:</b>	<b>1676484.44</b>	<b>105651.38 €</b>

**TABLA 4: BALANCE MENSUAL DE LA ENERGÍA PARA EL ESCENARIO 3V+5F**

#### 4.6.2 ESCENARIO 2V+6F

Para este escenario, la  $\alpha_{m\acute{a}x} = 1$ . Por otro lado, cuando funcionen varias *BVV* lo harán en Regulación Compartida.

El orden de funcionamiento de asociaciones será:

- "1V": Funciona una *BVV*.
- "2V": Funcionan dos *BVV* en regulación compartida.
- "2V + 1F": Funcionan dos *BVV* en regulación compartida y una *BVF*.
- "2V + 2F": Funcionan dos *BVV* en regulación compartida y dos *BVF*.
- "2V + 3F": Funcionan dos *BVV* en regulación compartida y tres *BVF*.
- "2V + 4F": Funcionan dos *BVV* en regulación compartida y cuatro *BVF*.
- "2V + 5F": Funcionan dos *BVV* en regulación compartida y cinco *BVF*.
- "2V + 6F": Funcionan dos *BVV* en regulación compartida y seis *BVF*.

##### 4.6.2.1 SIMULACIÓN HIDRÁULICA (2V+6F)

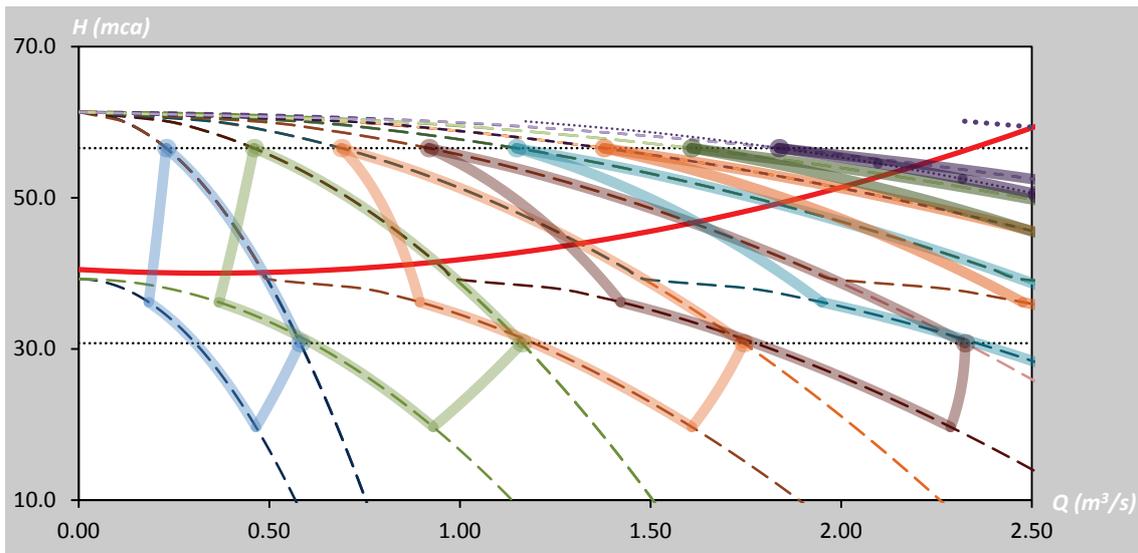
En la FIGURA 40 se muestra el mapa de zonas útiles resultado de la simulación. En ella, cualitativamente, podemos observar que:

- La curva de consigna queda bastante cubierta.

- Respecto a las zonas de recubrimiento, existen, entre las primeras asociaciones, pero ya no son tan generosas como en el anterior escenario.

Los resultados analíticos a efectos de cobertura de curva de consigna y recubrimiento acumulado son:

- Cobertura:  $C = 94'25\%$
- Recubrimiento acumulado:  $R_{Acum} = 12'42\%$



**FIGURA 40: MAPA DE ZONAS ÚTILES PARA ESCENARIO 2V+6F**

#### 4.6.2.2 SIMULACIÓN ENERGÉTICO ECONÓMICA (2V+6F)

En Tabla 5 se muestra el resultado de la simulación económica:

<b><math>C_{SI} (\text{€/AÑO}) =</math></b>	<b>155878.28</b>
<b>IE =</b>	<b>7581.92</b>
<b>Alquiler EqM =</b>	<b>975.00</b>
<b>B.I. (€/año) =</b>	<b>164435.19</b>
<b>IVA(21%) =</b>	<b>34531.39</b>
<b>Total Fact. (€/AÑO)</b>	<b>198966.59</b>

**TABLA 5: RESULTADO ENERGÉTICO-ECONÓMICO DEL ESCENARIO 2V+6F**

En la Tabla 6 se muestra el desarrollo mensual de la energía utilizada en el bombeo y su repercusión económica:

Mes	Energía (Kwh)	Coste (€)
Enero	0.00	0.00
Febrero	0.00	0.00
Marzo	29294.10	1773.53
Abril	57674.80	3298.15
Mayo	122139.14	7048.71
Junio	282738.59	17714.19
Julio	641033.32	46153.16
Agosto	373601.84	19760.17
Septiembre	116607.76	6989.08
Octubre	76502.09	4348.34
Noviembre	102.07	5.40
Diciembre	0.00	0.00
<b>Totales:</b>	<b>1699693.72</b>	<b>107090.72 €</b>

**TABLA 6: BALANCE MENSUAL DE LA ENERGÍA DEL ESCENARIO 2V+6F**

#### 4.6.3 ESCENARIO 1V+7F

Para este escenario, la  $\alpha_{m\acute{a}x} = 1'15$ .

- "1V": Funciona una *BVV*.
- "1V + 1F": Funcionan una *BVV* y una *BVF*.
- "1V + 2F": Funcionan una *BVV* y dos *BVF*.
- "1V + 3F": Funcionan una *BVV* y tres *BVF*.
- "1V + 4F": Funcionan una *BVV* y cuatro *BVF*.
- "1V + 5F": Funcionan una *BVV* y cinco *BVF*.
- "1V + 6F": Funcionan una *BVV* y seis *BVF*.
- "1V + 7F": Funcionan una *BVV* y siete *BVF*.

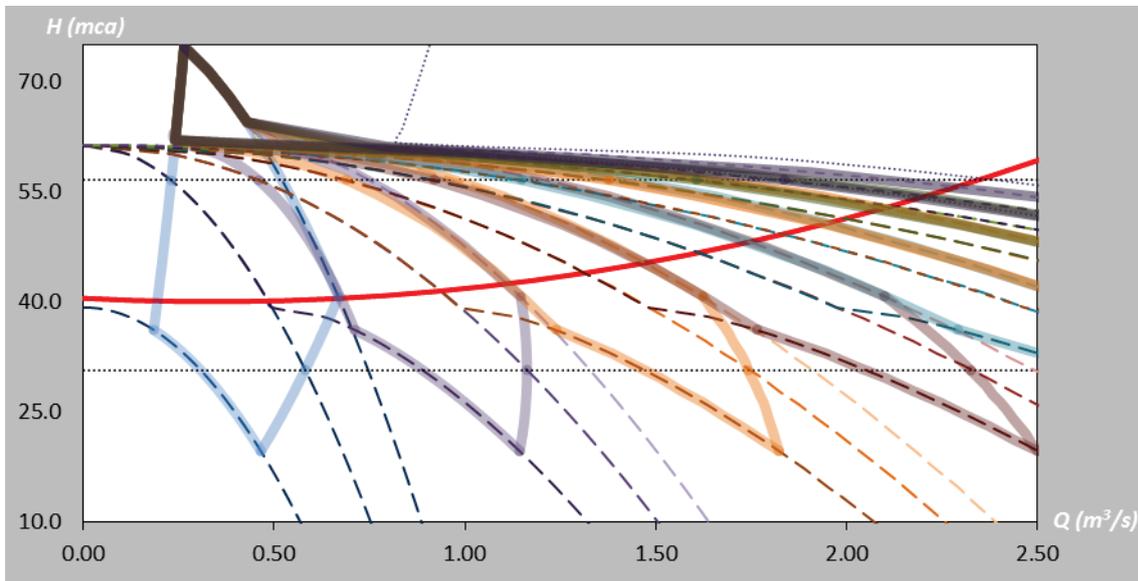
##### 4.6.3.1 SIMULACIÓN HIDRÁULICA (1V+7F)

En la FIGURA 41 se muestra el mapa de zonas útiles resultado de la simulación. En ella, cualitativamente, podemos observar que:

- La curva de consigna queda bastante cubierta.
- Las zonas de recubrimiento son prácticamente inexistentes.

Los resultados analíticos a efectos de cobertura de curva de consigna y recubrimiento acumulado son:

- Cobertura:  $C = 99'16\%$
- Recubrimiento acumulado:  $R_{Acum} = 2'11\%$



**FIGURA 41: MAPA DE ZONAS ÚTILES PARA ESCENARIO 1V+7F**

#### 4.6.3.2 SIMULACIÓN ENERGÉTICO ECONÓMICA (1V+7F)

En la Tabla 7 se muestra el resultado de la simulación energético económica:

<b><math>C_{SI}</math> (€/AÑO)=</b>	<b>173401.73</b>
<b>IE=</b>	<b>8434.26</b>
<b>Alquiler EqM=</b>	<b>975.00</b>
<b>B.I.(€/año)=</b>	<b>182810.99</b>
<b>IVA(21%)=</b>	<b>38390.31</b>
<b>Total Fact. (€/AÑO)</b>	<b>221201.30</b>

**TABLA 7: RESULTADO ENERGÉTICO-ECONÓMICO DEL ESCENARIO 1V+7F**

En la Tabla 8 se muestra el desarrollo mensual de la energía utilizada en el bombeo y su repercusión económica:

mes	Energía	coste
Enero	0.00	0.00
Febrero	0.00	0.00
Marzo	29294.10	1773.53
Abril	57674.80	3298.15
Mayo	136050.30	7902.50
Junio	356465.53	22300.15
Julio	702627.52	49939.30
Agosto	508545.81	26897.50
Septiembre	120692.55	7243.24
Octubre	76502.09	4348.34
Noviembre	102.07	5.40
Diciembre	0.00	0.00
<b>Totales:</b>	<b>1987954.80</b>	<b>123708.11</b>

*TABLA 8: BALANCE MENSUAL DE LA ENERGÍA DEL ESCENARIO 1V+7F*

#### 4.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Tabla 9 se incluyen los datos y resultados de los tres escenarios simulados.

A nivel energético y económico, se puede observar que el escenario destacadamente más caro es el formado por “1V + 7F” mientras que la diferencia entre “2V + 6F” y el “3V + 5F” no es tan relevante, siendo este último el más económico.

Mirando el primer indicador hidráulico, vemos que el que menos cobertura de curva de consigna ofrece es el escenario “2V + 6F”, mientras que los escenarios “3V + 5F” y “1V + 7F” valores similares, siendo este último mencionado el que presenta mayor cobertura. Respecto a este indicador se puede decir que cualquiera de los tres escenarios cubre razonablemente bien la curva de consigna.

Las diferencias entre los escenarios se incrementan cuando miramos el indicador de recubrimiento acumulado. El escenario que mayor valor presenta es el “3V + 5F” con un recubrimiento de 45’86%. El escenario “2V + 6F” queda en segundo lugar con 12’42% mientras que el escenario “1V + 7F” solo ofrece un recubrimiento de 2’11.

	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3
	<b>3V+5F</b>	<b>2V+6F</b>	<b>1V+7F</b>
NºBVV	3	2	1
NºBVF	5	6	7
NºB (TOTAL)	8	8	8
ALFA MÍN	0.80	0.80	0.80
ALFA MÁX	1.00	1.00	1.15
COBERTURA DE C.C.	<b>98.89%</b>	<b>94.25%</b>	<b>99.16%</b>
RECUBRIMIENTO ACUMULADO	<b>45.86%</b>	<b>12.42%</b>	<b>2.11%</b>
COSTE DE LA ENERGÍA (€/AÑO)	<b>105651.38</b>	<b>107090.72</b>	<b>123708.11</b>
TOTAL FACTURADO (€/AÑO)	<b>198,289.93</b>	<b>200,116.25</b>	<b>221,201.30</b>
OBSERVACIONES	Regulación Compartida	Regulación Compartida	

**TABLA 9: RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS TRES ESCENARIOS**

A la vista de los resultados, parece lógico descartar el escenario 3 compuesto por “1V + 7F”. De esta forma, la elección se debe centrar entre el escenario 1 (“3V + 5F”) y el escenario 2 (“1V + 7F”), procediendo a plantear la amortización del variador que diferencia los escenarios por una parte, y cuantificando el valor mínimo necesario de recubrimiento acumulado para asegurar la posibilidad de cambio de asociación (paro o marcha de una bomba), sin merma de rendimiento, según el sistema de regulación finalmente instalado.



***CAPÍTULO***

---

***5. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS***



## 5.1 CONCLUSIONES

### 5.1.1 SÍNTESIS DEL TRABAJO

El objetivo principal de este trabajo era crear un procedimiento que ayudase a seleccionar la mejor estrategia de regulación de un equipo de bombeo desde el punto de vista energético.

Para ello se ha construido un modelo hidráulico de visualización que, con un novedoso procedimiento de apilamiento de áreas, consigue crear el mapa de zonas útiles de todas las asociaciones que conforman el escenario en cuestión. Esta herramienta permite al usuario hacerse una idea razonablemente veraz de las prestaciones que le va a dar el escenario en estudio.

De la misma manera, podrá localizar los parámetros de este escenario que no son idóneos (tipo de bomba, nº de bombas, etc.) y que, de no ser corregidos harán que el coste energético del funcionamiento de la instalación sea excesivo.

Este modelo, además del evidente potencial de visualización, ha sido implementado para que calcule dos indicadores hidráulicos. Estos son:

- Indicador de cobertura de curva de consigna: Cuantifica el porcentaje de curva de consigna, desde el caudal mínimo hasta el caudal máximo, que queda cubierto por alguna de las zonas útiles que ofrece el escenario a través de sus posibles asociaciones.
- Indicador de recubrimiento acumulado: Cuantifica la cantidad de caudales recubiertos por dos zonas útiles consecutivas dentro de los márgenes impuestos, en la curva de consigna, por el caudal mínimo y el caudal máximo.

Una vez simulados los escenarios que se han considerado oportunos, descartados o corregidos los que se han calificado como no adecuados, las opciones quedarán dispuestas cada una con sus correspondientes valores de estos dos indicadores.

Como complemento al modelo hidráulico, se ha construido otro modelo, esta vez de naturaleza energética y económica. El modelo necesita para su funcionamiento la serie de caudales horarios demandados de un periodo de tiempo de funcionamiento real o estimado, normalmente un año. Con este input, y los caudales óptimos de corte entre combinaciones de bombas que el usuario habrá deducido del modelo anterior (si hay dudas sobre varias posibilidades de caudales de corte, siempre se pueden hacer varias simulaciones para seleccionar), el modelo calcula la energía gastada por el equipo de bombeo y el coste de esta

energía durante ese periodo de funcionamiento. El modelo está implementado bajo las premisas de facturación existentes en el territorio español, concretamente en la zona de la península (zona 0), pero sería extrapolable a cualquier otro modo de facturación.

Finalmente, el modelo devuelve un resumen de los datos y resultados más relevantes de cada escenario.

El usuario dispone de esta forma de una herramienta de apoyo a la decisión a la hora de elegir la mejor estrategia de regulación.

### **5.1.2 CONCLUSIONES**

El modelo hidráulico de visualización ofrece al usuario una visión fiel del escenario que se le implementa y puede ser utilizado como apoyo a la decisión del técnico para descartar o validar, respecto a las premisas planteadas, dicho escenario. Además, la interacción que permite el modelo al usuario, sobre todo a la hora de realizar pequeños cambios, es razonablemente buena, lo que ayuda al usuario a formarse opinión sobre el funcionamiento de cada escenario.

El modelo energético económico es capaz de calcular con fidelidad tanto el gasto energético como el coste de esa energía. Permitiendo al usuario hacer un balance de resultados para elegir el mejor escenario.

## **5.2 DESARROLLOS FUTUROS**

El procedimiento de simulación de escenarios de bombeos presentado es una herramienta novedosa e innovadora que pretende arrojar luz sobre el problema de la elección de la mejor estrategia de regulación para un equipo de bombeo.

En su primera versión ha cumplido los objetivos impuestos facilitando la elección al usuario y ahorrando tiempo y esfuerzo. Es por tanto una herramienta de enorme proyección de futuro. El encarecimiento de la energía en la actualidad obliga más, si cabe, al estudio y desarrollo de herramientas y procedimientos de esta índole.

Por otro lado, se debe entender que el techo de esta aplicación es todavía desconocido, ya que solo se ha probado de forma académica. La herramienta deberá ser contrastada introduciendo datos de diversos equipos de bombeo, modificando, desarrollando y, en definitiva, evolucionando los modelos hasta encontrar su máximo rendimiento.

Cabe destacar la versatilidad de la aplicación, que podrá ser usada como apoyo en el momento de proyectar un nuevo bombeo, para plantear alguna modificación en un bombeo existente o, incluso como herramienta de diagnóstico, simulando y detectando un funcionamiento anómalo que, por ejemplo, se haga visible arrojando un gasto de energía desmesurado.

Por otro lado, la aplicación, una vez desarrollada y conseguido su máximo potencial, puede pasar a formar parte de un procedimiento más complejo. Puede ayudar, por ejemplo, a dar más información sobre bombas y asociaciones de bombas a nivel de fabricantes. Pudiendo ser incluida, la información conseguida, en catálogos de bombas o de variadores.

En definitiva, todo lo expuesto, hace pensar que la herramienta presentada puede ser el primer escalón de un futuro software de apoyo a la decisión en el campo de estudio que nos concierne.

A destacar también como una posible línea de trabajo la obtención de datos fiables sobre el funcionamiento de las bombas y motores eléctricos a diferente velocidad de la nominal. En este trabajo se ha tomado como hipótesis el que se cumplen las leyes de semejanza hidráulica pero, en realidad, es bien sabido que ello es solo una aproximación aceptable siempre y cuando la velocidad de giro no difiera en exceso de lo nominal.

El conocimiento preciso de las curvas " $HQ$ " y " $\eta Q$ " reales para diferentes velocidades de giro permitiría poder analizar la energía consumida de una manera más realista. También el rendimiento del motor se verá afectado, por lo que habría que ensayar su funcionamiento teniendo en cuenta la velocidad de giro y las condiciones de carga. Y no hay que olvidar que los variadores de frecuencia introducen también unas pérdidas que deberían ser tenidas en cuenta.

Todo ello redundaría en un mejor conocimiento del funcionamiento de la instalación que permitiría que las simulaciones efectuadas para comparar posibles escenarios tuvieran resultados más fiables y se acercaran más a la realidad, para "informar" al usuario de cual debe ser la solución a adoptar en cada caso.



***CAPÍTULO***

---

***6. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS***



- 
- ***“Ingeniería Hidráulica Aplicada en los Sistemas de Distribución de Agua”*** (E. Cabrera, V. Espert, J. García-Serra, F. Martínez). 3ª Edición 2009.
  - Material Didáctico de la asignatura ***“Auditorías Energéticas”*** pertenecientes al Máster de tecnología Energética para el Desarrollo Sostenible. Curso 2011-2012.
  - Material Didáctico de la Asignatura ***“Hidráulica Avanzada”*** impartida por Jorge García-Serra y perteneciente al Máster de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Curso 2011-2012.
  - Material Didáctico de la Asignatura ***“Fenómenos Transitorios, Regulación y Protección de Redes de Distribución de Agua”*** impartida por Jorge García-Serra y perteneciente al Máster de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Curso 2011-2012.
  - ***“Evaluating the approximation of the affinity laws and improving the estimate of the efficiency for variable speed pumping”*** (Angus R. Simpson, Angela Marchi). Journal of Hydraulic Engineering. Submitted January 24, 2013; accepted May 13, 2013 posted ahead of print May 15, 2013. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000776. pp. 1-12.
  - ***“Estudio de la mejora de la regulación de la estación de bombeo del Sector V-1 de la Comunidad de Regantes del Canal del Zújar”*** (J. García-Serra, J. Soriano, F. Arregui, R. Cobacho). Julio 2011.
  - ***“<http://www.bombas-ideal.com>”*** consultado en Julio de 2013.
  - ***“Catálogo de Bombas de la marca Ideal” serie RN/ RNI.***
  - ***“Datos Técnicos de Hidráulica. Bombas”*** Bombas Ideal.



***ANEXO***

---

***1. ANEXO. VISUALIZACIÓN DE LA  
CONSTRUCCIÓN DEL MAPA DE ZONAS  
ÚTILES.***



### A. CONSTRUCCIÓN DEL MAPA DE ZONAS ÚTILES. ESCENARIO 3V+5F

En la figura se muestra una captura de la parte de cálculo analítico del modelo hidráulico de visualización. Las celdas en azul se corresponden con datos que deberá implementar el usuario, en verde las celdas que son resultado de cálculo y en gris las celdas que se corresponden con cálculos auxiliares.

CURVA NOMINAL Y DE RENDIMIENTO					
A=	81.3	D=	4.3	$\eta_{max}$ =	0.86
B=	0.0	E=	5.2	Max X=	2.5
C=	-90.5			Max Y=	75.0
$(N_{max} \text{ tipo } "H=A+BQ+CQ^2")$					
$(C_{Rto} \text{ tipo } "Rto=DO-EQ^2")$					
				Min X=	0.0
				Min Y=	0.0

CÁLCULO DE VÉRTICES DE Z. ÚTIL					
(Entre C. Motrices y C. de isorrendimiento)					
(Desde arriba en sentido horario)					
	Q	H		$\Delta Q$	$\Delta H$
V5	$N_{max}=K1$	0.230	56.6	$Q5-Q6=$	0.35
V6	$N_{max}=K2$	0.581	30.8	$Q6-Q2=$	0.00
V2	$N_{min}=K2$	0.581	30.8	$Q2-Q3=$	0.12
V3	$N_{min}=K2$	0.465	19.7	$Q3-Q4=$	0.28
V4	$N_{min}=K1$	0.184	36.2	$Q4-Q1=$	0.05
V1	$N_{min}=K1$	0.230	56.6	$Q1-Q5=$	0.00
V5	$N_{max}=K1$	0.230	56.6	$N^{\Delta}x,y=$	10 pasos

PARÁMETROS DE C.C. Y CÁLCULO DE INTERSECCIONES CON Z.U.					
(tipo $"H=G+JQ+LQ^2"$ si es otra curva cambiar parametrización)					
Q=	40.5			Q	H
J=	-2.8	Intersec.1	CC= $N_{max}$	0.484	40.11
L=	4.1	Intersec.2	CC= $N_{min}$	#JNUM!	#JNUM!
		Intersec.3	CC=K1	0.194	40.11
		Intersec.4	CC=K2	0.667	40.46

PARÁMETRO DE RTO MÍN Y CÁLCULO DE V. DEPENDIENTES					
$\eta_{min}$ =	0.7000	q1=	0.230	H1=	56.56
$\eta_{min}(AL)$ =	0.7000	q2=	0.581	H2=	30.76
$\eta_{min}(SB)$ =	0.7066	Activar Rto. de Sarbu-Borza:	NO		
K1=	1070.7	K2=	91.0		

PARÁMETROS RELACIÓN DE VELOCIDADES DE GIRO					
Alfa.min=	0.80				
$C_{vel}(H=0)$ =	0.659				
Alfa.max=	1.00				
$C_{vel}(H=0)$ =	0.823				
	2.5				

N°BOMBAS					
N°BVV=	1	$Q(H=0)$ =	0.823	m3/s	Puntero
N°BVF=	0	$Q(H=0)$ =	-	m3/s	Q
N°B <sub>vel</sub> =	1	$Q(H=0)$ =	0.823	m3/s	H
		$N^{\Delta}x=$	50	pasos	0.00
					0.00

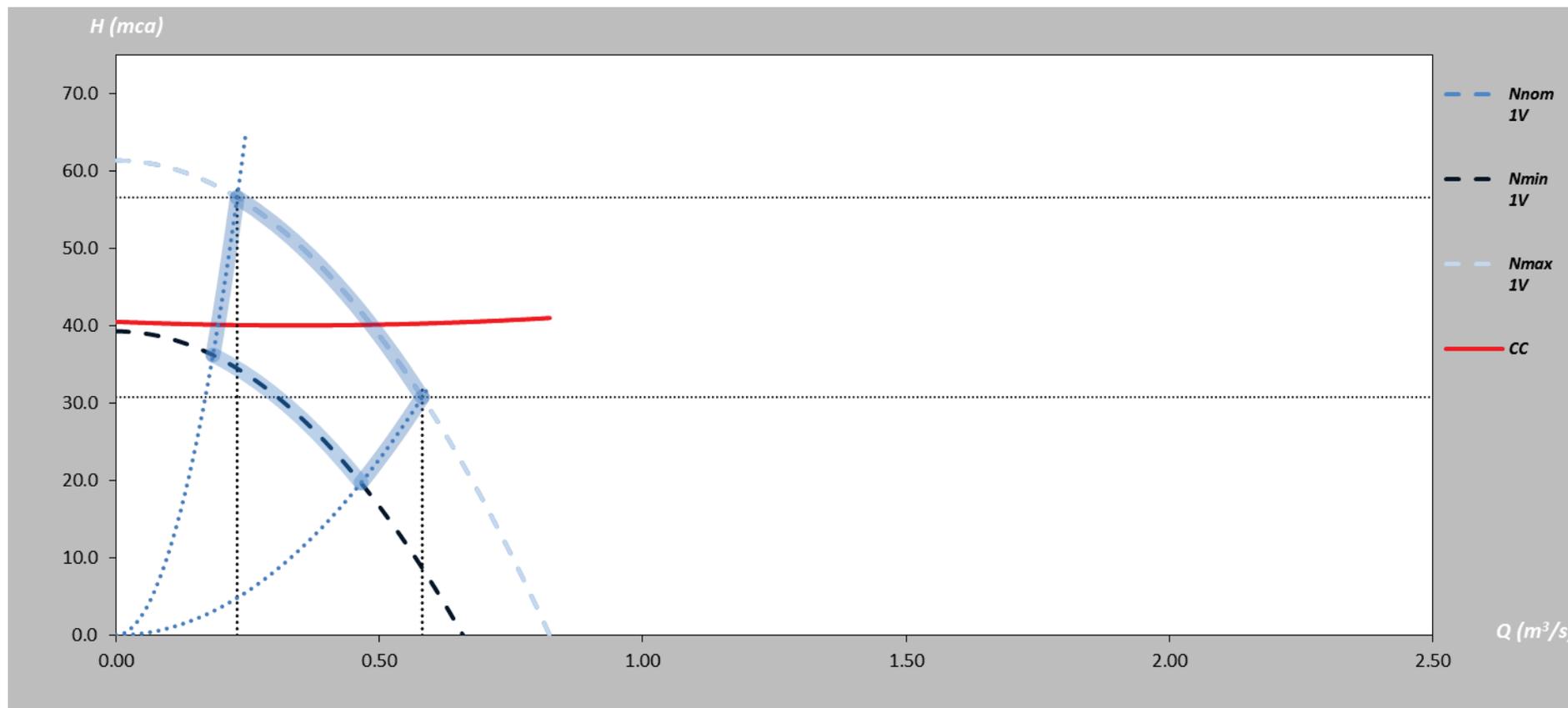
Ecuaciones:				
$H_{cc}(Q_{cc})$ =	1	40.1	#JNUM!	40.1
$Q_{1,1}(H_{cc}=H_{cc1})$ =	2	0.484		
$Q_{1,2}(H_{cc}=H_{cc1})$ =	3	-0.454		
$Q_{2,1}(H_{cc}=H_{cc1})$ =	4	#JNUM!		
$Q_{2,2}(H_{cc}=H_{cc1})$ =		#JNUM!		
$Q_{3,1}(H_{cc}=H_{cc1})$ =			-0.196	
$Q_{3,2}(H_{cc}=H_{cc1})$ =			0.194	
$Q_{4,1}(H_{cc}=H_{cc1})$ =				-0.699
$Q_{4,2}(H_{cc}=H_{cc1})$ =				0.667

C = 14.45%	
C [β]=	0.1445 :1
C [β-1]=	0.0000 :1
R=Recubrim=	0.0000 :1
R <sub>accu</sub> =	0.00% %
Q(max)=	2.20 m3/s
Q(min)=	0.19 m3/s
$l_{vel}[\eta]$ =	0.484 m3/s
$l_{vel}[\eta]$ =	0.194 m3/s
$l_{vel}[\beta-1]$ =	0.000 m3/s
$l_{vel}[\beta-1]$ =	0.000 m3/s

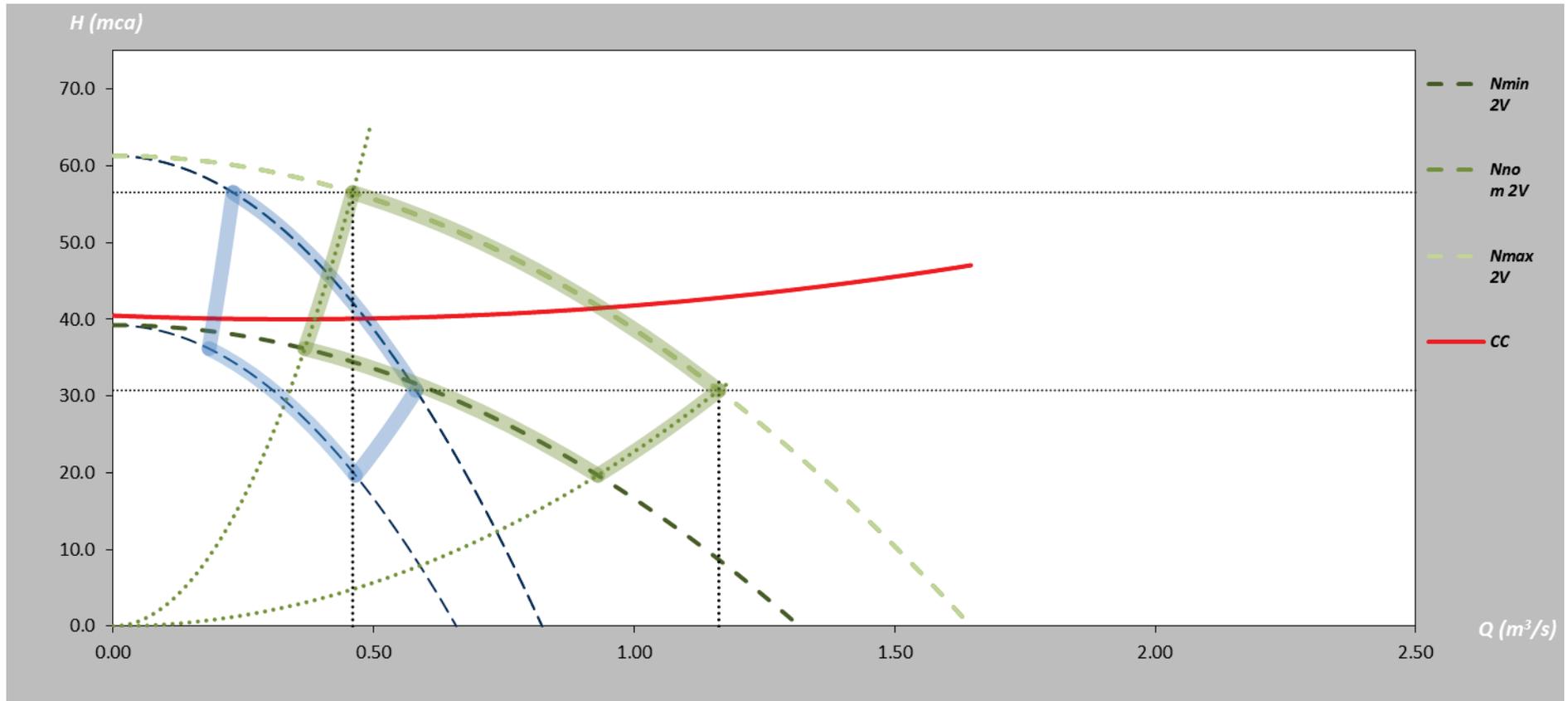
TABLA 10: PARTE ANALÍTICA DEL MODELO HIDRÁULICO DE VISUALIZACIÓN

En la FIGURA 42 se visualiza la primera zona útil construida.



**FIGURA 42: ESCENARIO 3V+5F. VISUALIZACIÓN DE LA PRIMERA ZONA ÚTIL (1xBVV)**

Se muestra ahora el apilamiento de la segunda zona útil.



**FIGURA 43: ESCENARIO 3V+5F. APILAMIENTO DE LA SEGUNDA ZONA ÚTIL.**

Se muestra ahora el apilamiento de la tercera zona útil.

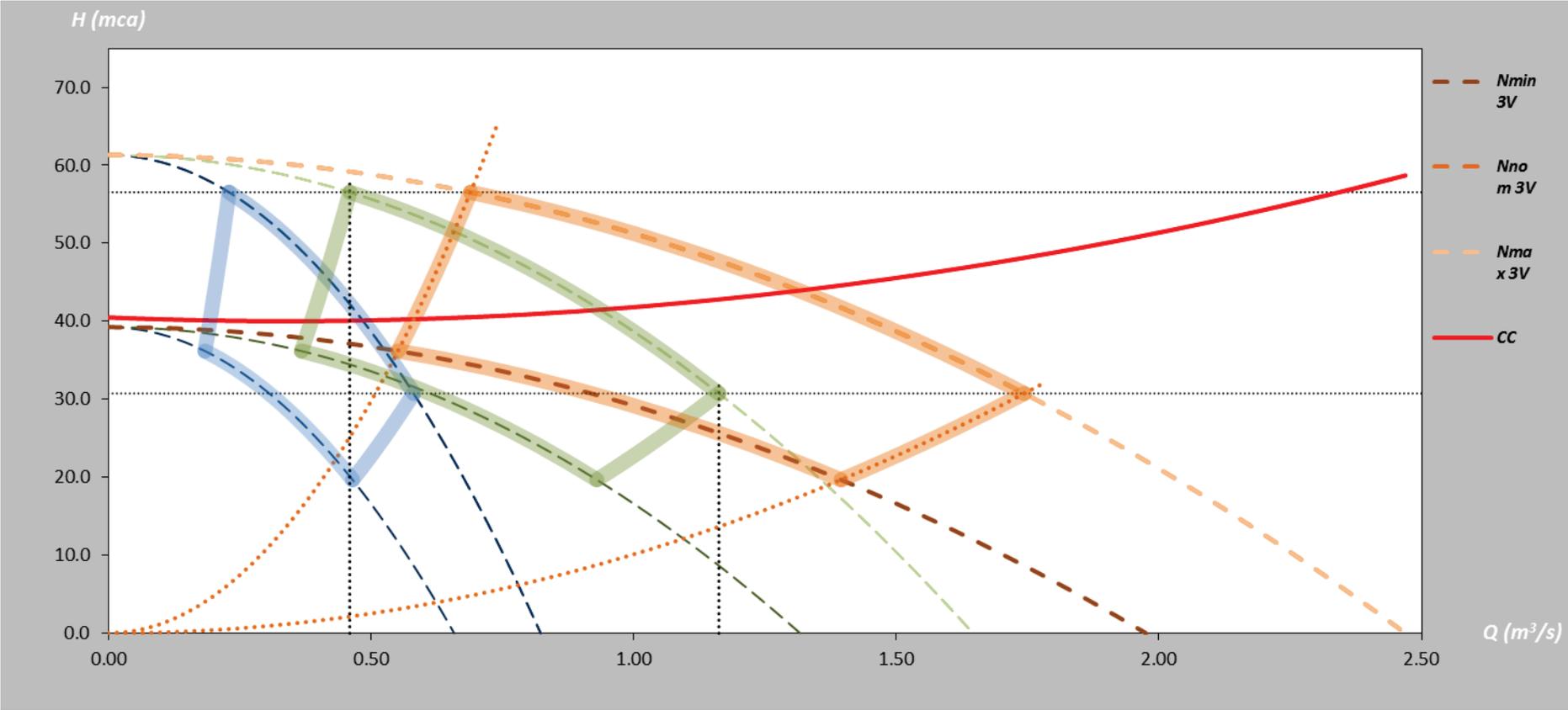
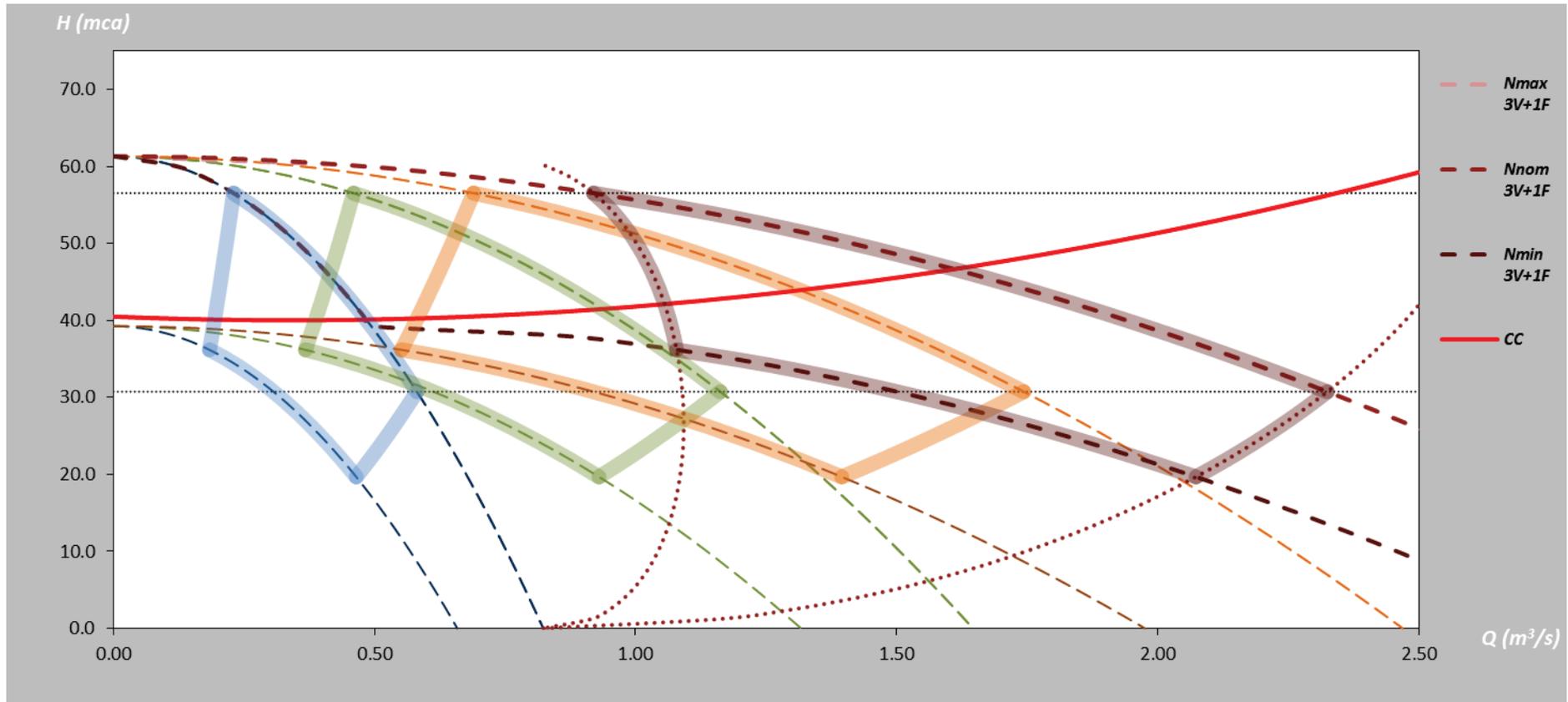


FIGURA 44: ESCENARIO 3V+5F. APILAMIENTO DE LA TERCERA ZONA ÚTIL

Se muestra ahora el apilamiento de la cuarta zona útil.



**FIGURA 45: ESCENARIO 3V+5F. APILAMIENTO DE LA CUARTA ZONA ÚTIL**

Se muestra ahora el apilamiento de la quinta zona útil.

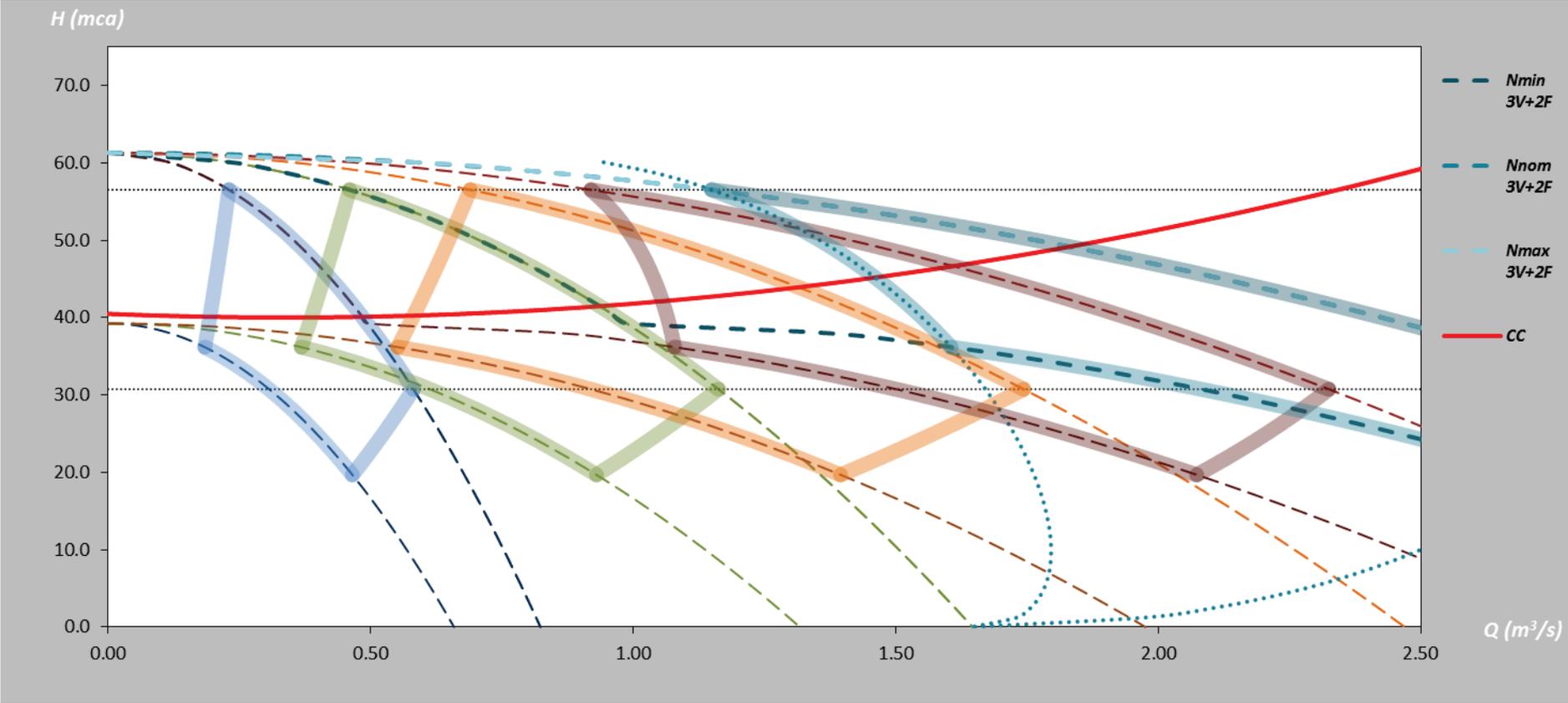
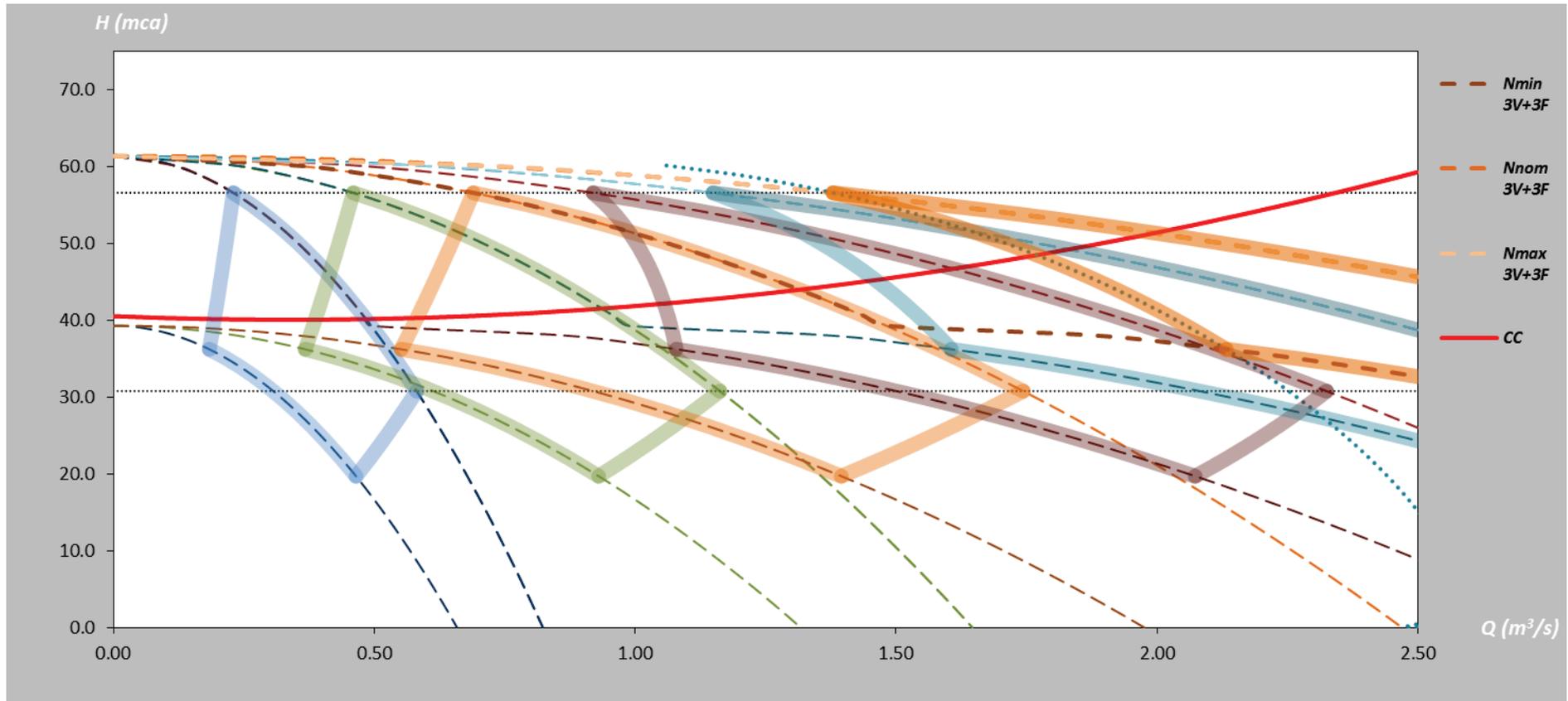


FIGURA 46: ESCENARIO 3V+5F. APILAMIENTO DE LA QUINTA ZONA ÚTIL

Se muestra ahora el apilamiento de la sexta zona útil.



**FIGURA 47: ESCENARIO 3V+5F. APILAMIENTO DE LA SEXTA ZONA ÚTIL**

Se muestra ahora el apilamiento de la séptima zona útil.

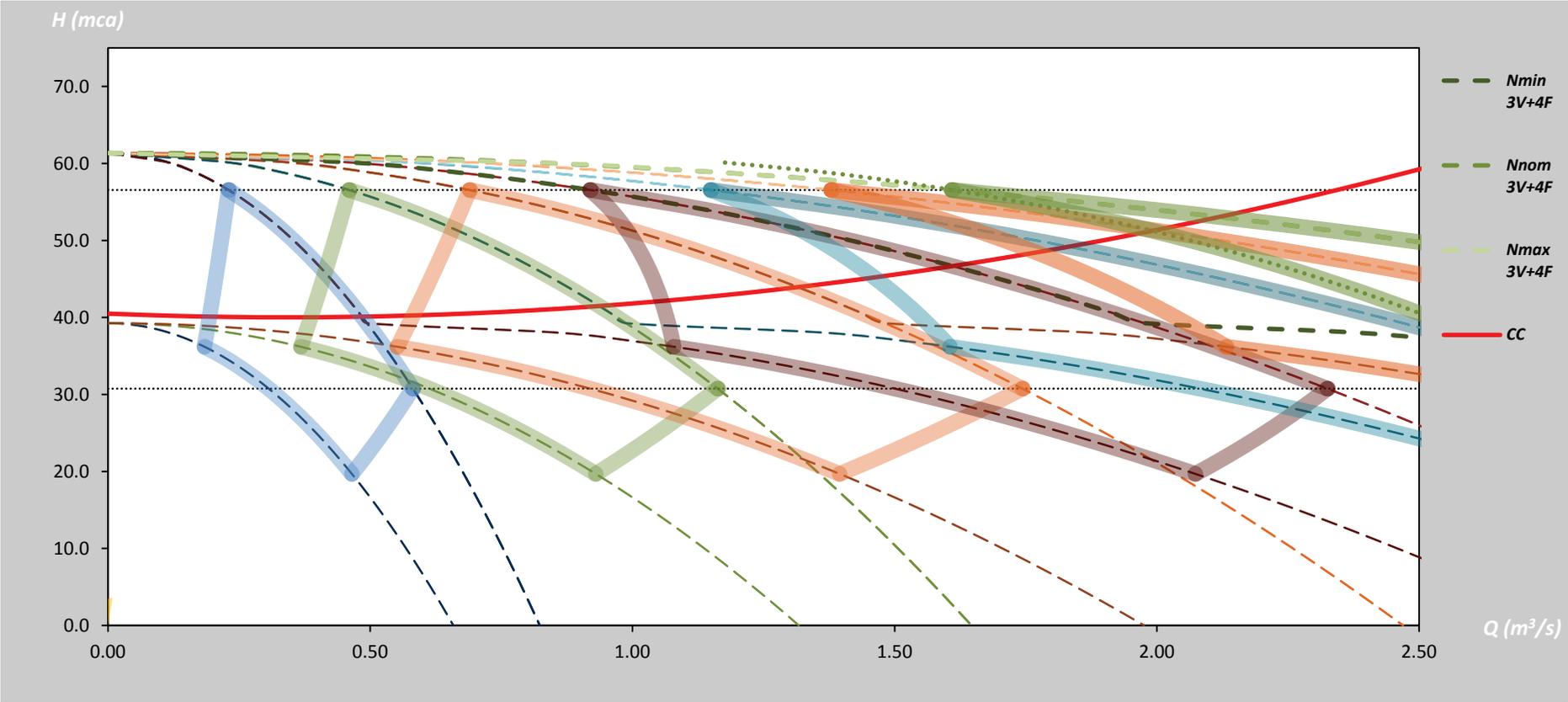
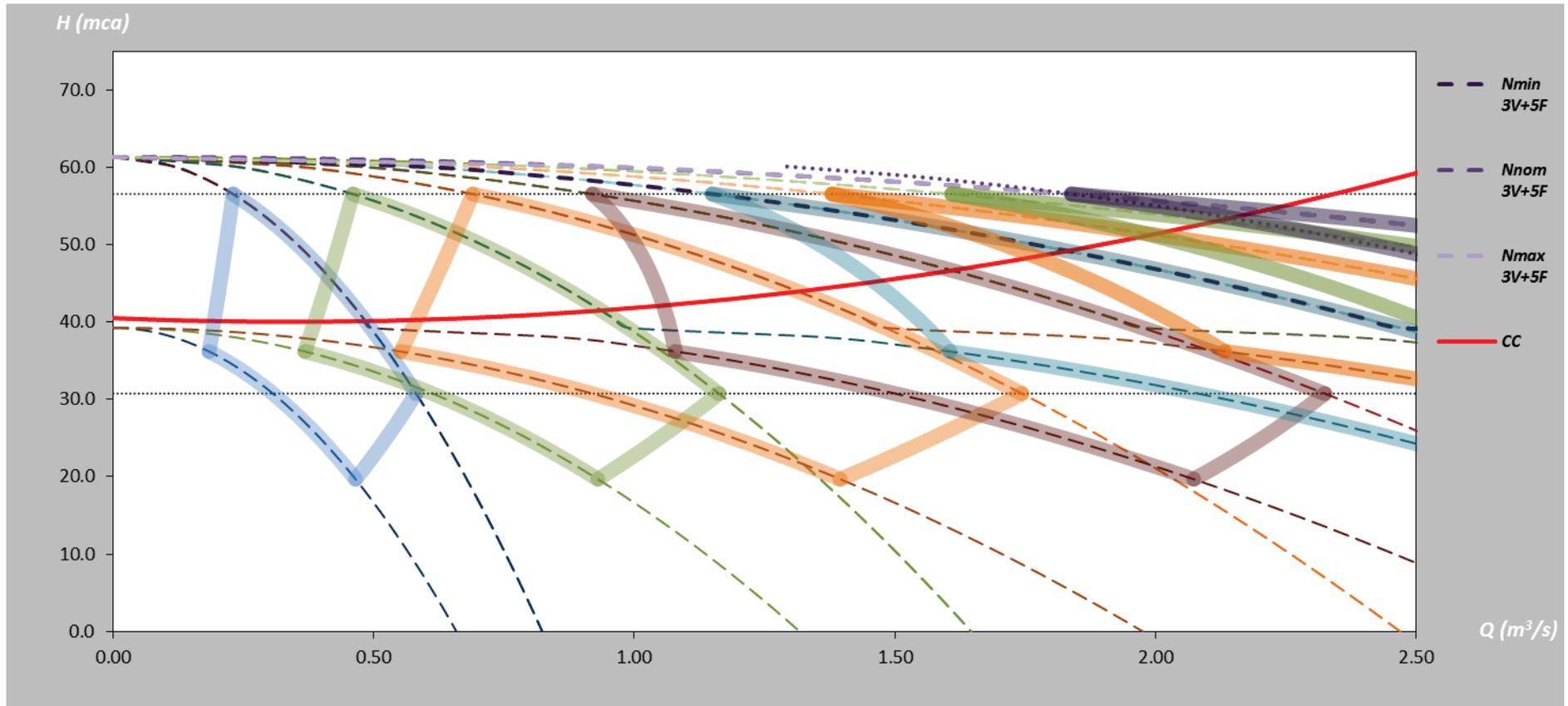


FIGURA 48: ESCENARIO 3V+5F. APILAMIENTO DE LA SÉPTIMA ZONA ÚTIL.

Se muestra ahora el apilamiento de la octava zona útil.



**FIGURA 49: ESCENARIO 3V+5F. APILAMIENTO DE LA OCTAVA ZONA ÚTIL**

Vista completa del escenario

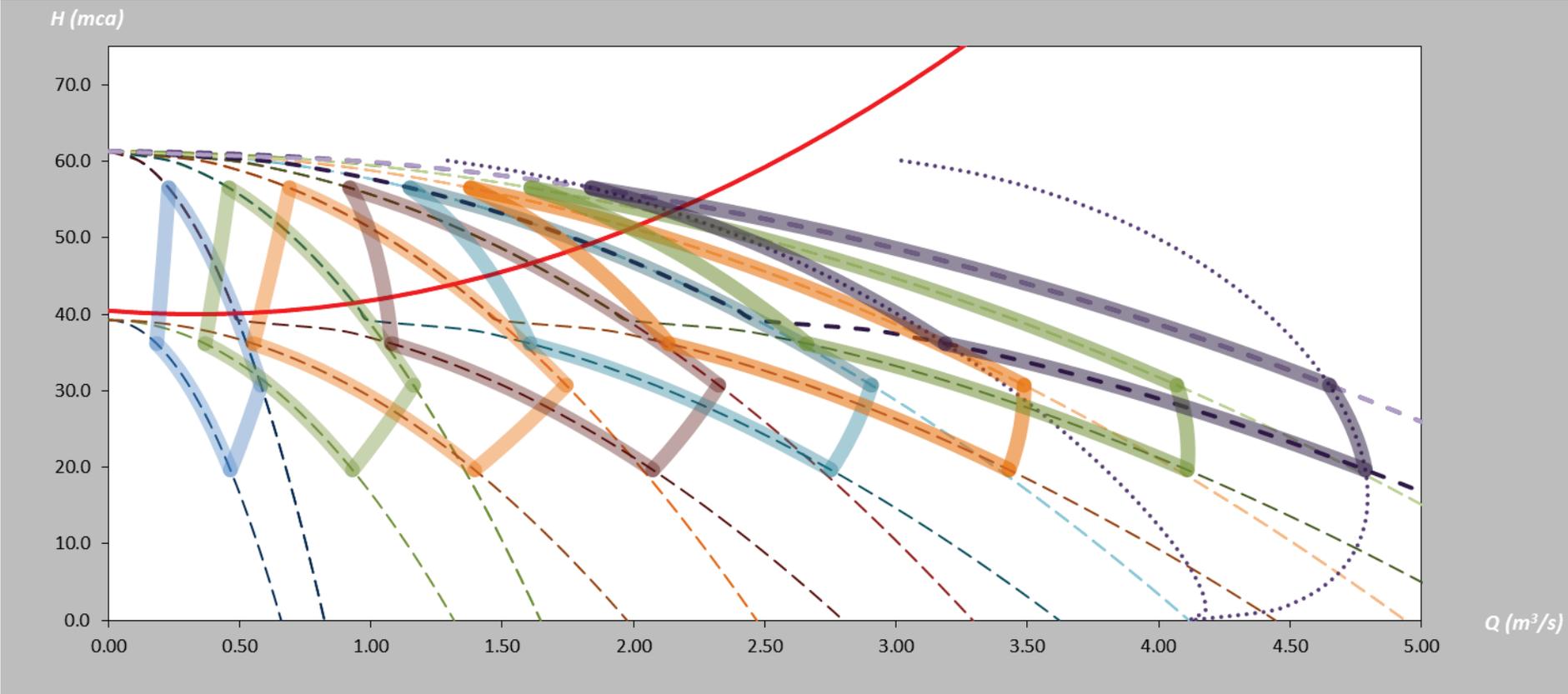
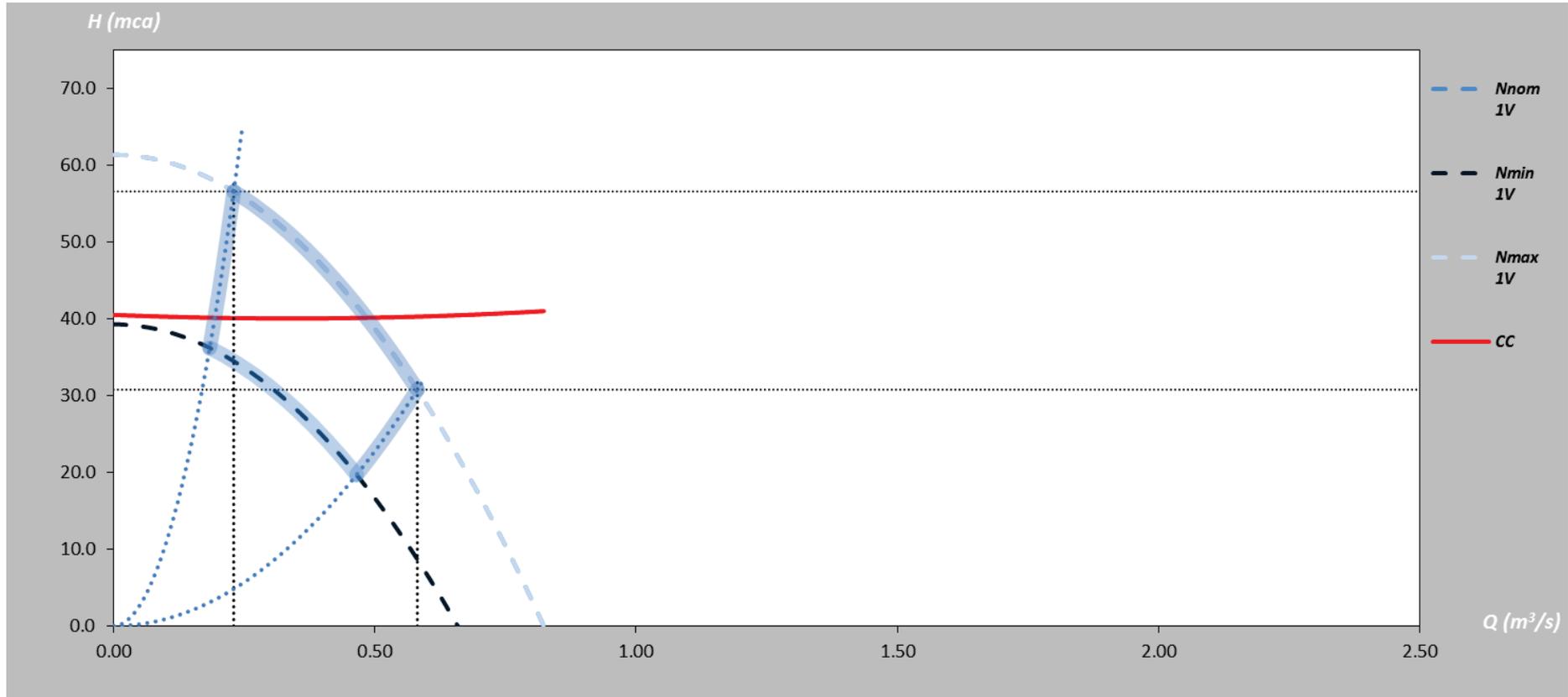


FIGURA 50: ESCENARIO 3V+5F. VISTA COMPLETA

## B. CONSTRUCCIÓN DEL MAPA DE ZONAS ÚTILES. ESCENARIO 2V+6F

De forma análoga al apartado anterior, se incluye en la siguiente figura, el resultado de la construcción de la primera zona útil del escenario:



**FIGURA 51: ESCENARIO 2V+6F. VISUALIZACIÓN DE LA PRIMERA ZONA ÚTIL**

Se muestra ahora el apilamiento de la segunda zona útil.

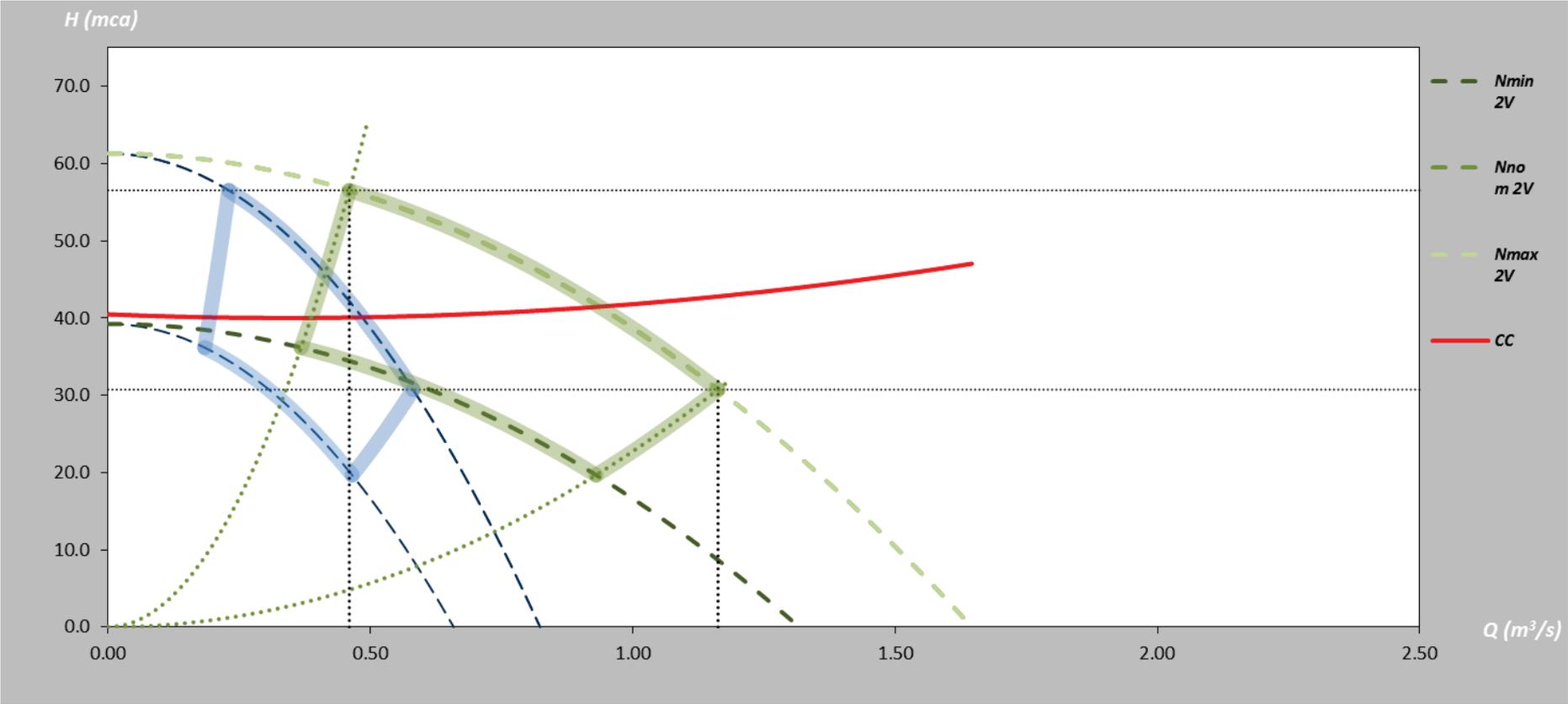
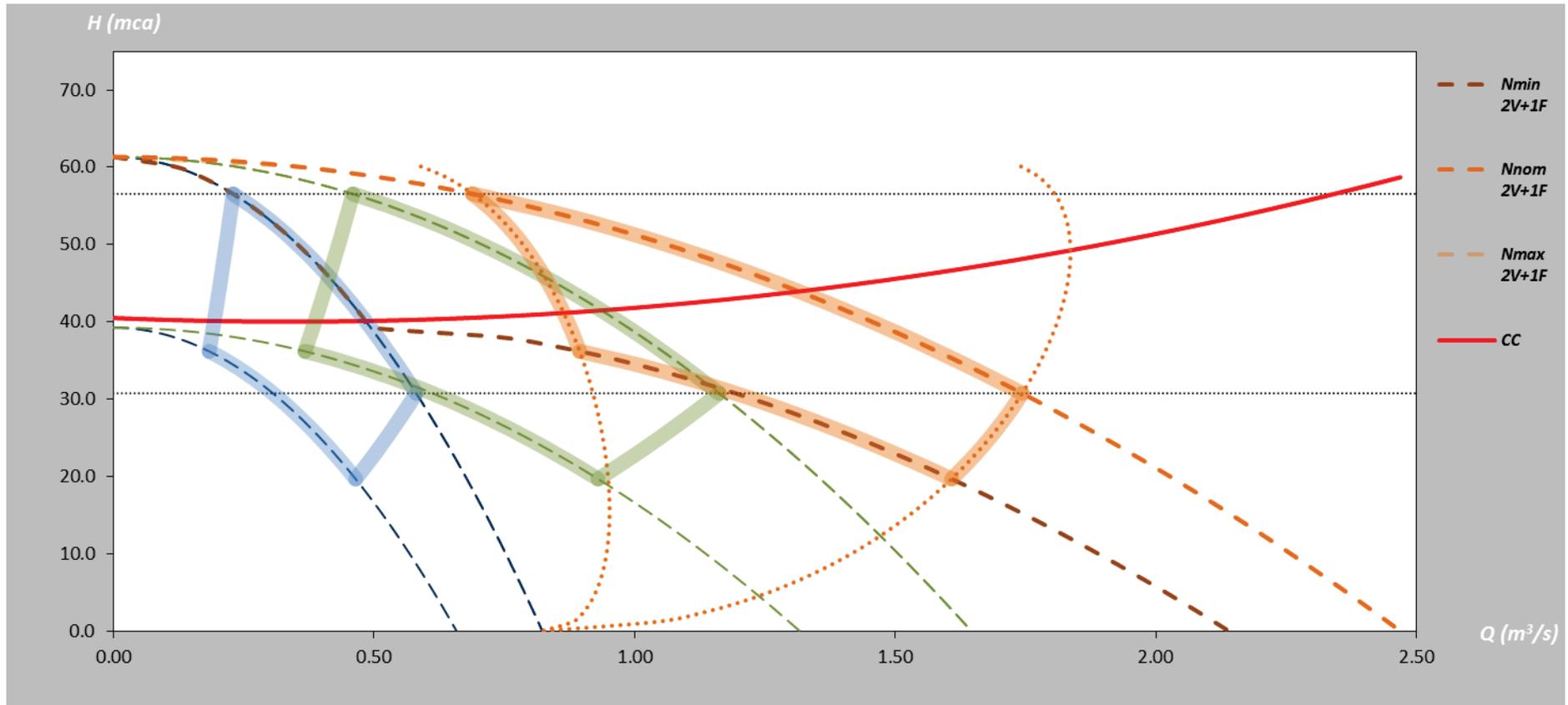


FIGURA 52: ESCENARIO 2V+6F. APILAMIENTO DE LA SEGUNDA ZONA ÚTIL

Se muestra ahora el apilamiento de la tercera zona útil.



**FIGURA 53: ESCENARIO 2V+6F. APILAMIENTO DE LA TERCERA ZONA ÚTIL**

Se muestra ahora el apilamiento de la cuarta zona útil.

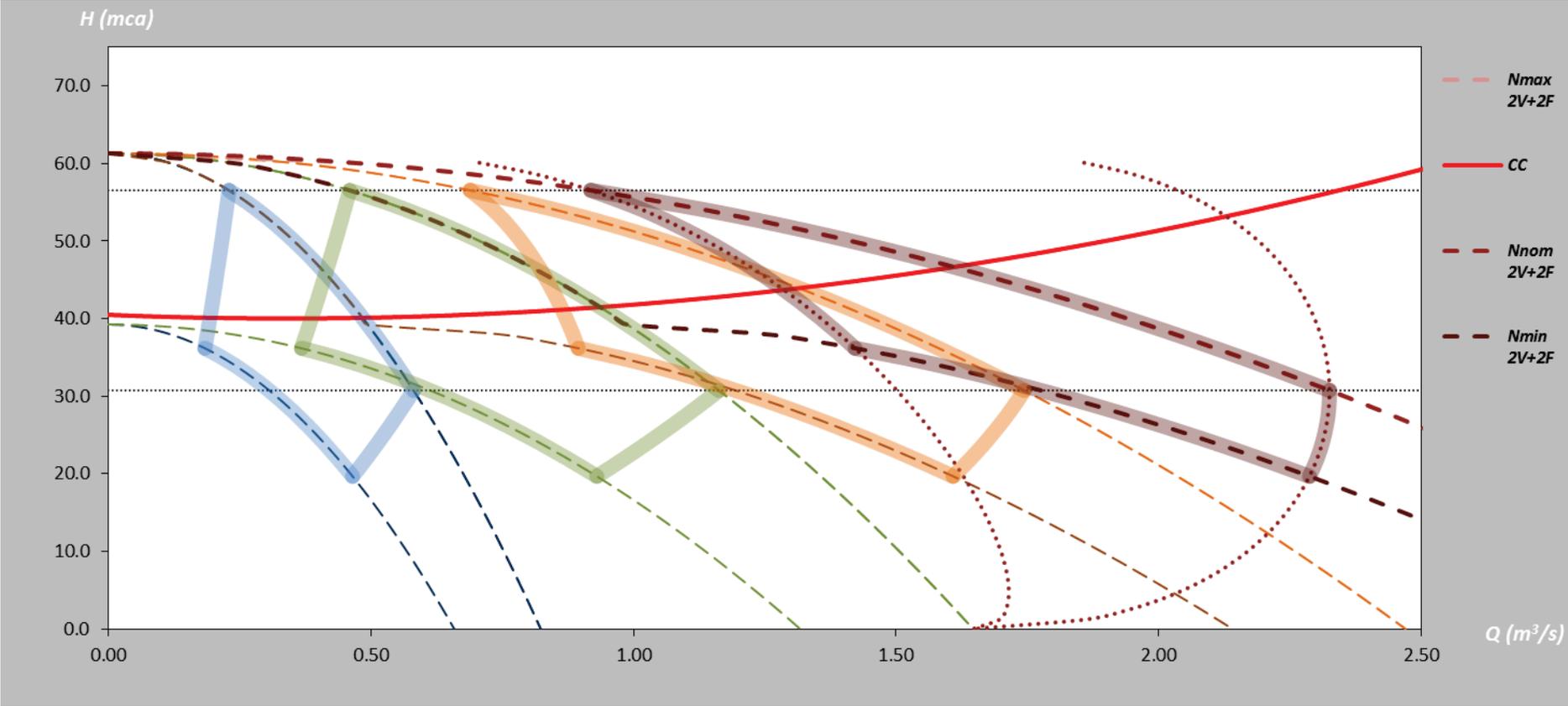
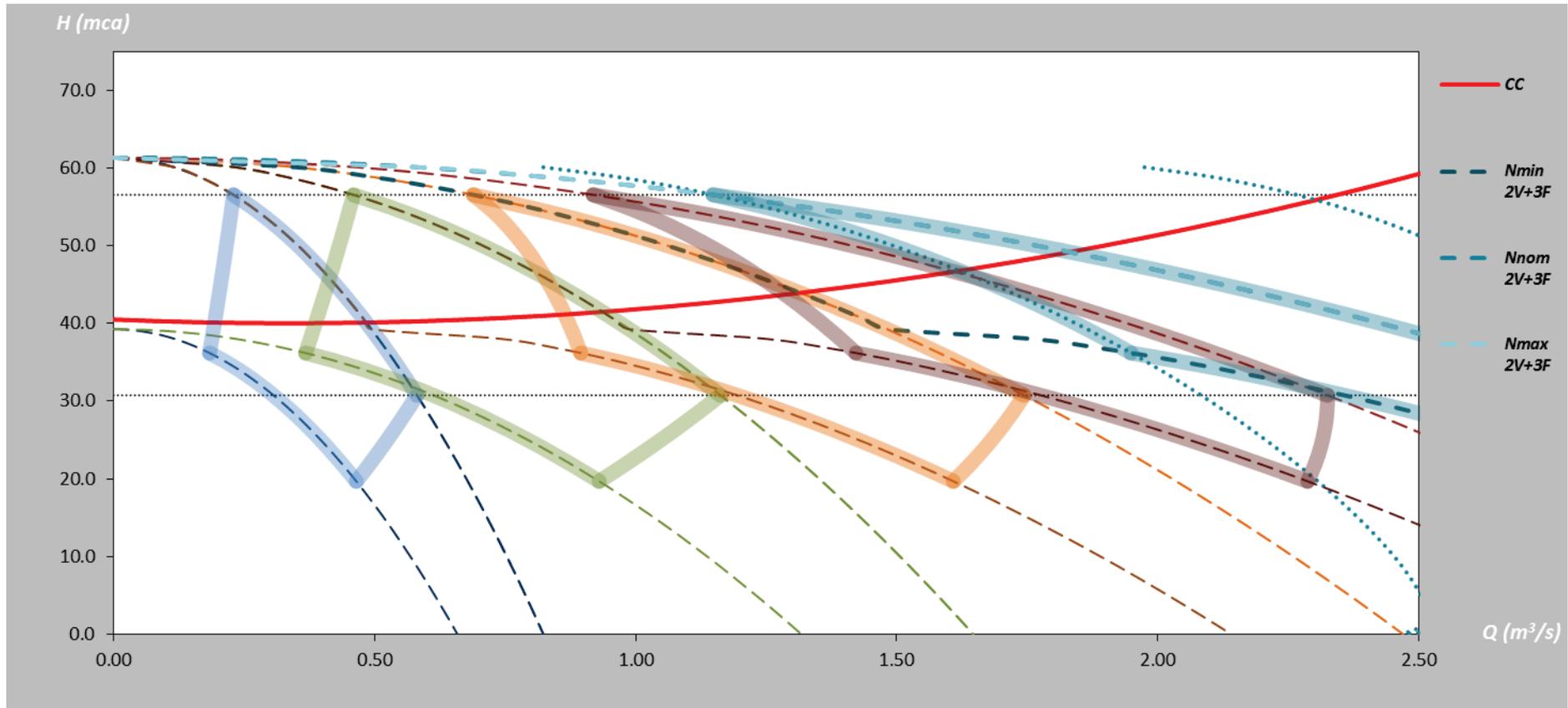


FIGURA 54: ESCENARIO 2V+6F. APILAMIENTO DE LA CUARTA ZONA ÚTIL

Se muestra ahora el apilamiento de la quinta zona útil.



**FIGURA 55: ESCENARIO 2V+6F. APILAMIENTO DE LA QUINTA ZONA ÚTIL**

Se muestra ahora el apilamiento de la sexta zona útil.

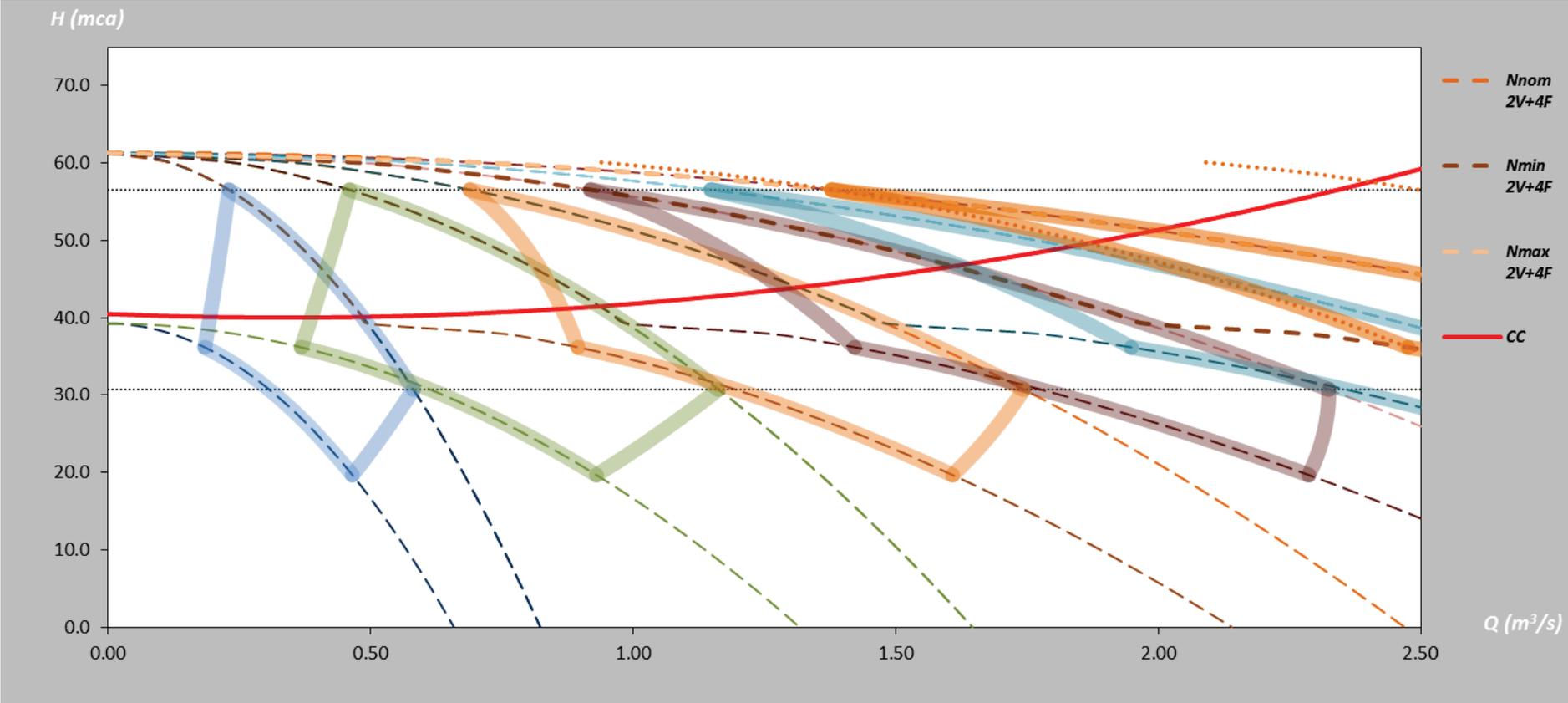
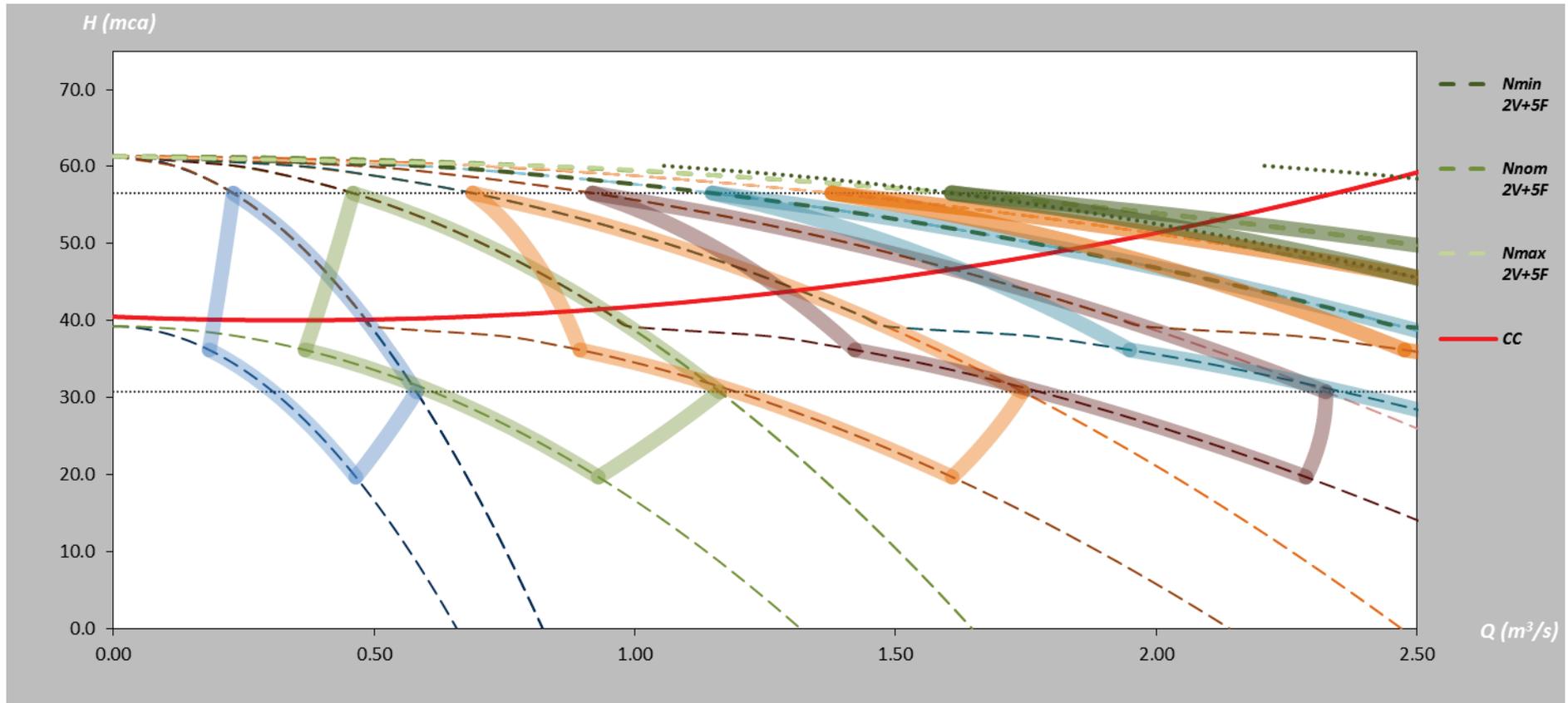


FIGURA 56: ESCENARIO 2V+6F. APILAMIENTO DE LA SEXTA ZONA ÚTIL

Se muestra ahora el apilamiento de la séptima zona útil.



**FIGURA 57: ESCENARIO 2V+6F. APILAMIENTO DE LA SÉPTIMA ZONA ÚTIL**

Se muestra ahora el apilamiento de la octava zona útil.

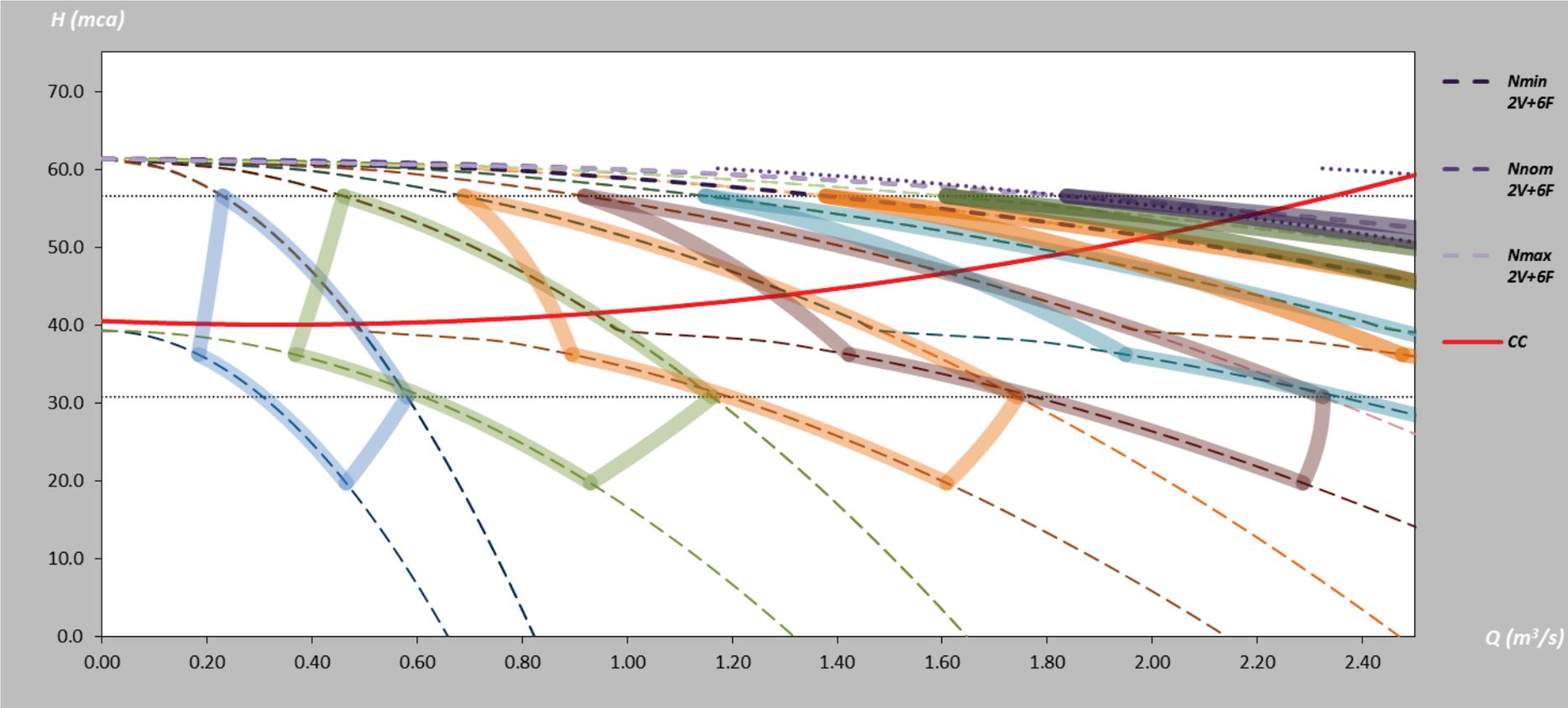


FIGURA 58: ESCENARIO 2V+6F. APILAMIENTO DE LA OCTAVA ZONA ÚTIL

Vista completa del escenario

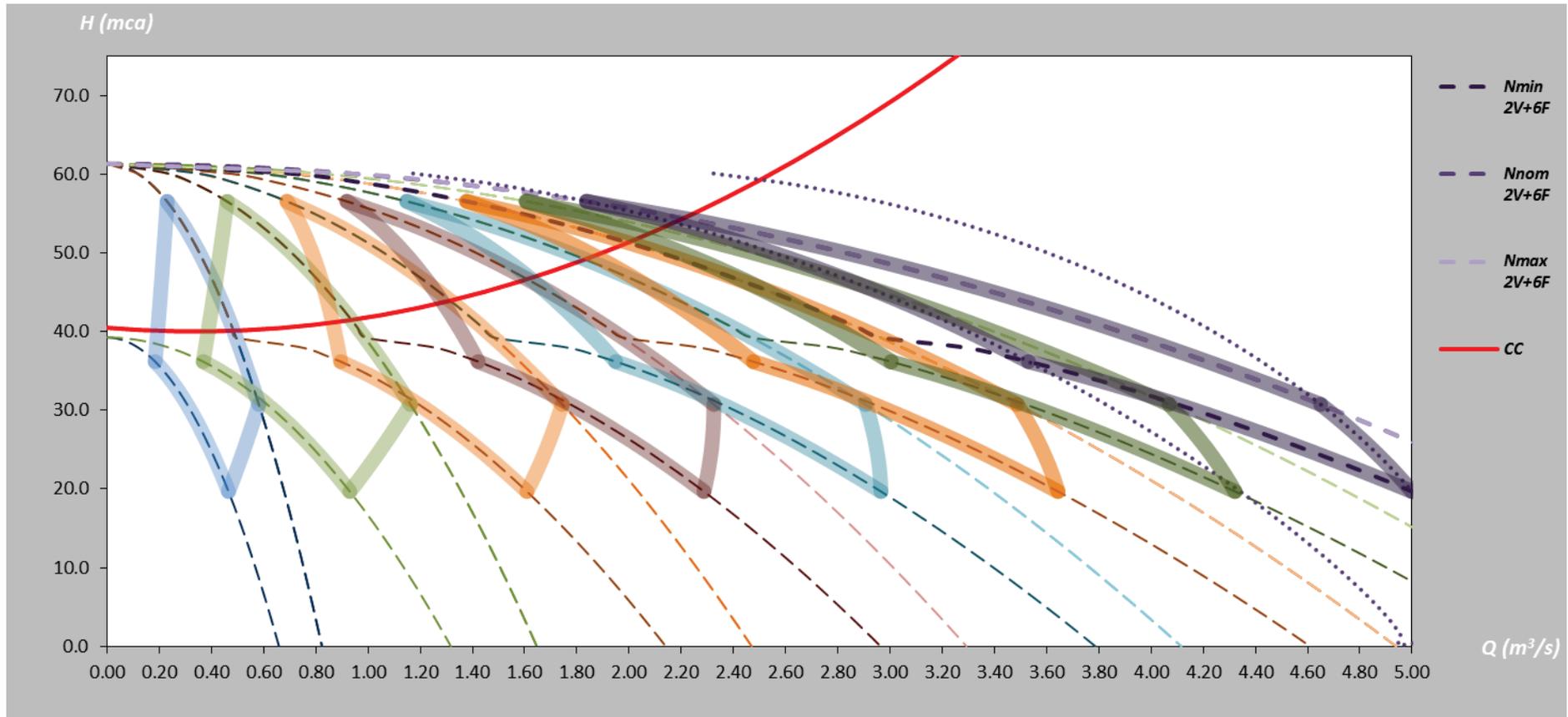


FIGURA 59: VISTA COMPLETA DEL ESCENARIO 2V+6F

### C. CONSTRUCCIÓN DEL MAPA DE ZONAS ÚTILES. ESCENARIO 1V+7F

De forma análoga al apartado anterior, se incluye en la siguiente figura, el resultado de la construcción de la primera zona útil del escenario:

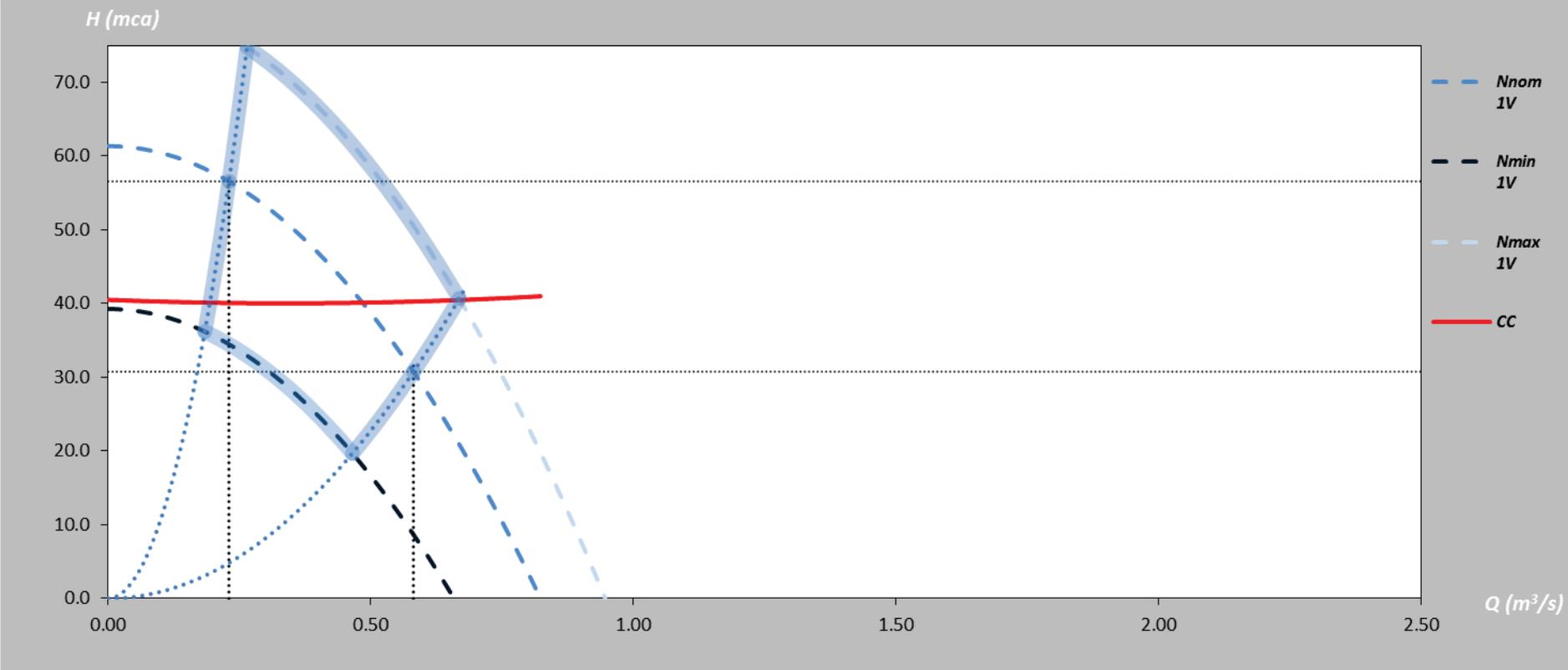
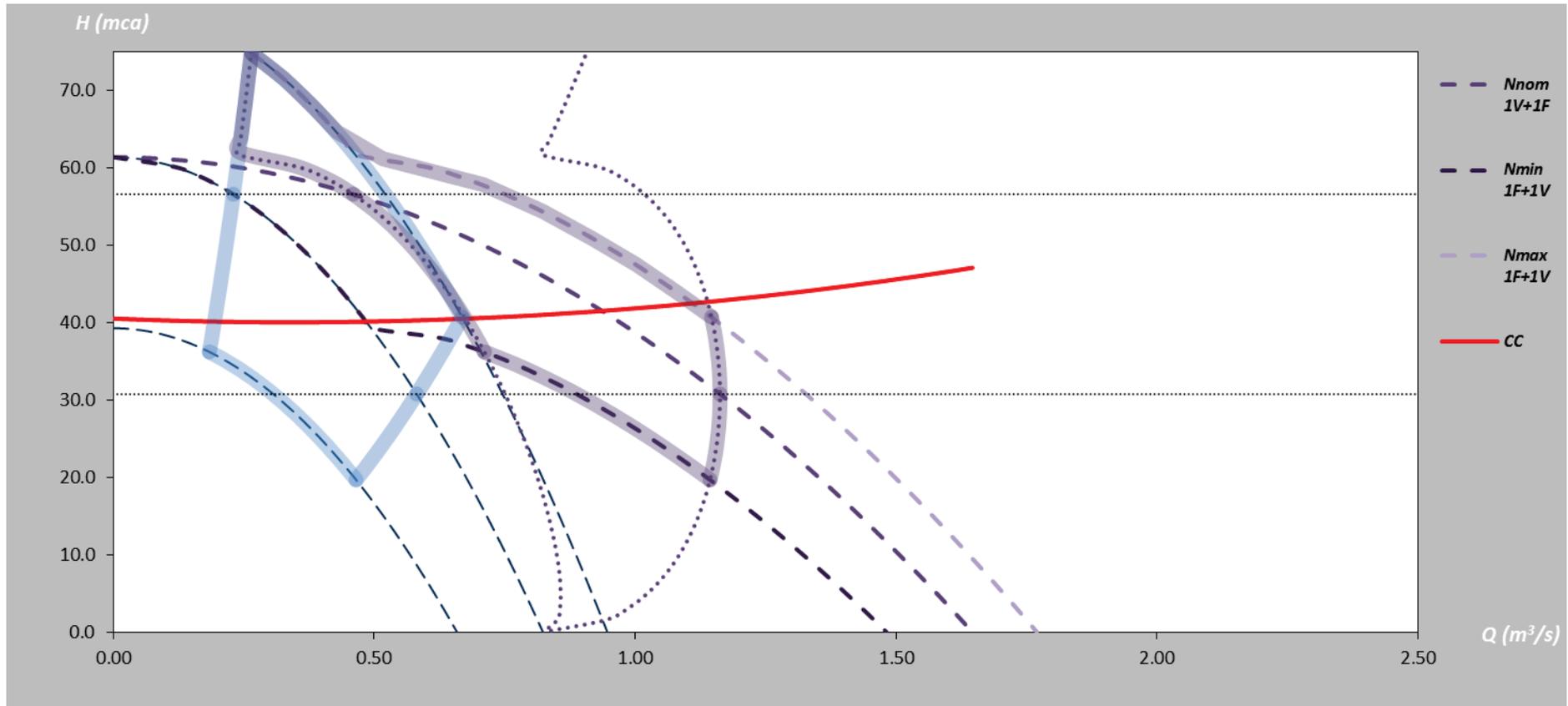


FIGURA 60: ESCENARIO 1V+7F. VISUALIZACIÓN DE LA PRIMERA ZONA ÚTIL

Se muestra ahora el apilamiento de la segunda zona útil.



**FIGURA 61: ESCENARIO 1V+7F. APILAMIENTO DE LA SEGUNDA ZONA ÚTIL**

Se muestra ahora el apilamiento de la tercera zona útil.

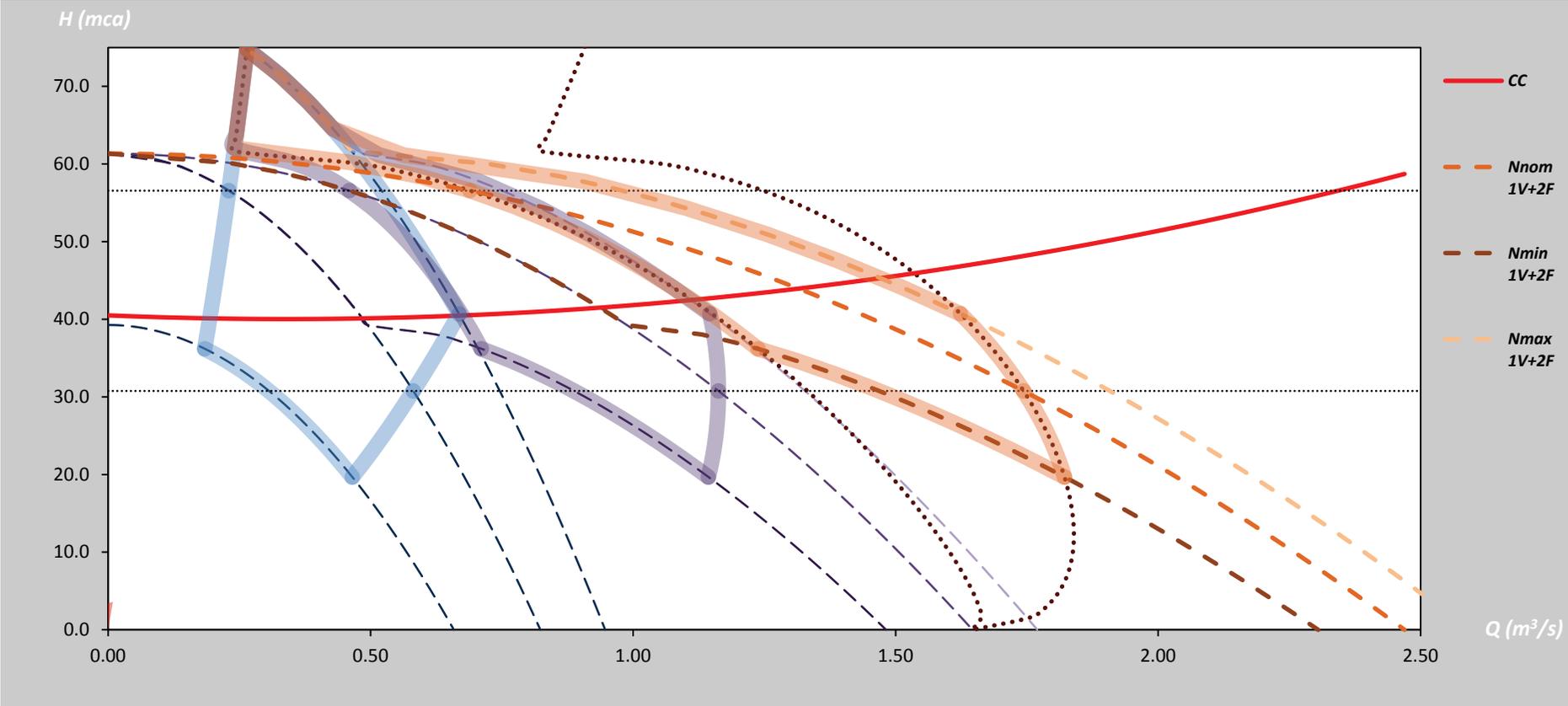


FIGURA 62: ESCENARIO 1V+7F. APILAMIENTO DE LA TERCERA ZONA ÚTIL

Se muestra ahora el apilamiento de la cuarta zona útil.

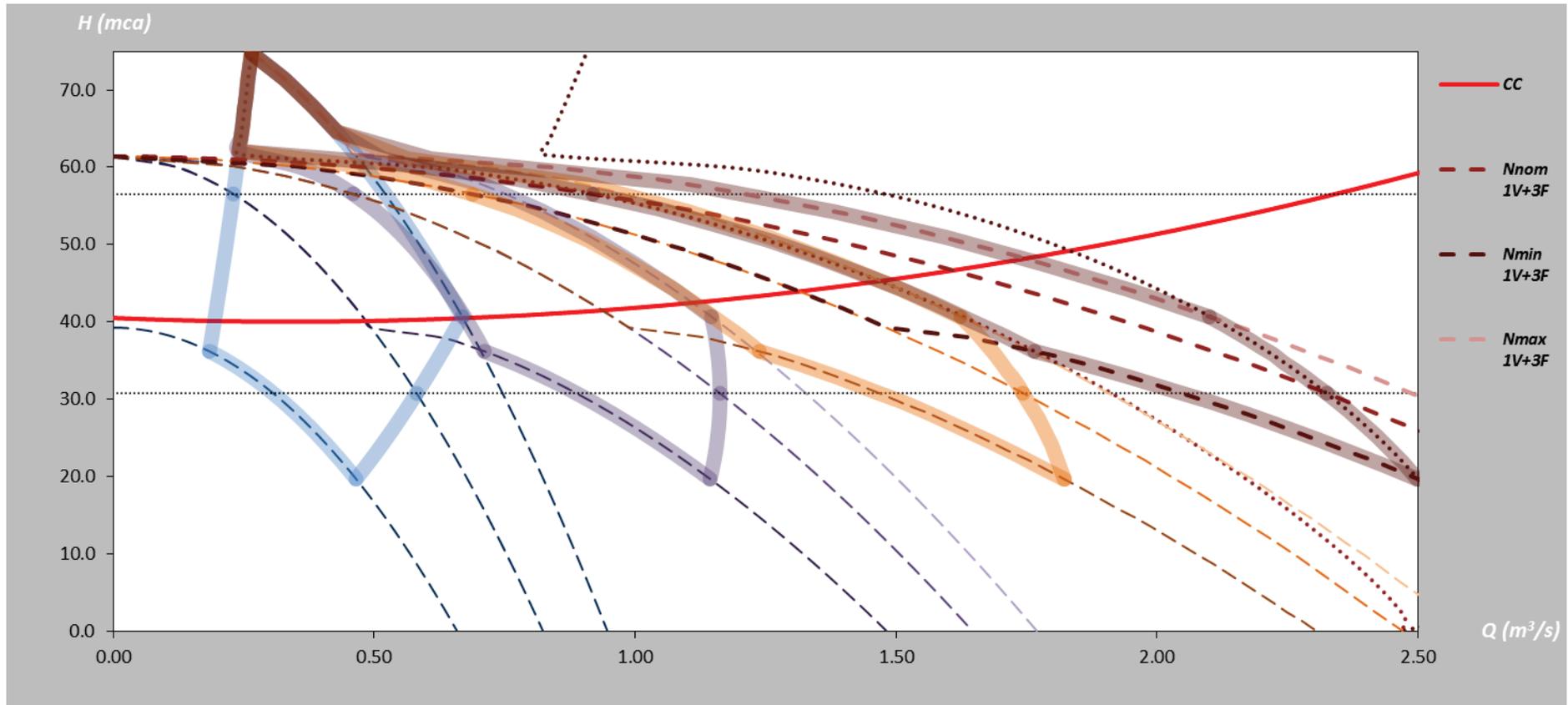


FIGURA 63: ESCENARIO 1V+7F. APILAMIENTO DE LA CUARTA ZONA ÚTIL

Se muestra ahora el apilamiento de la quinta zona útil.

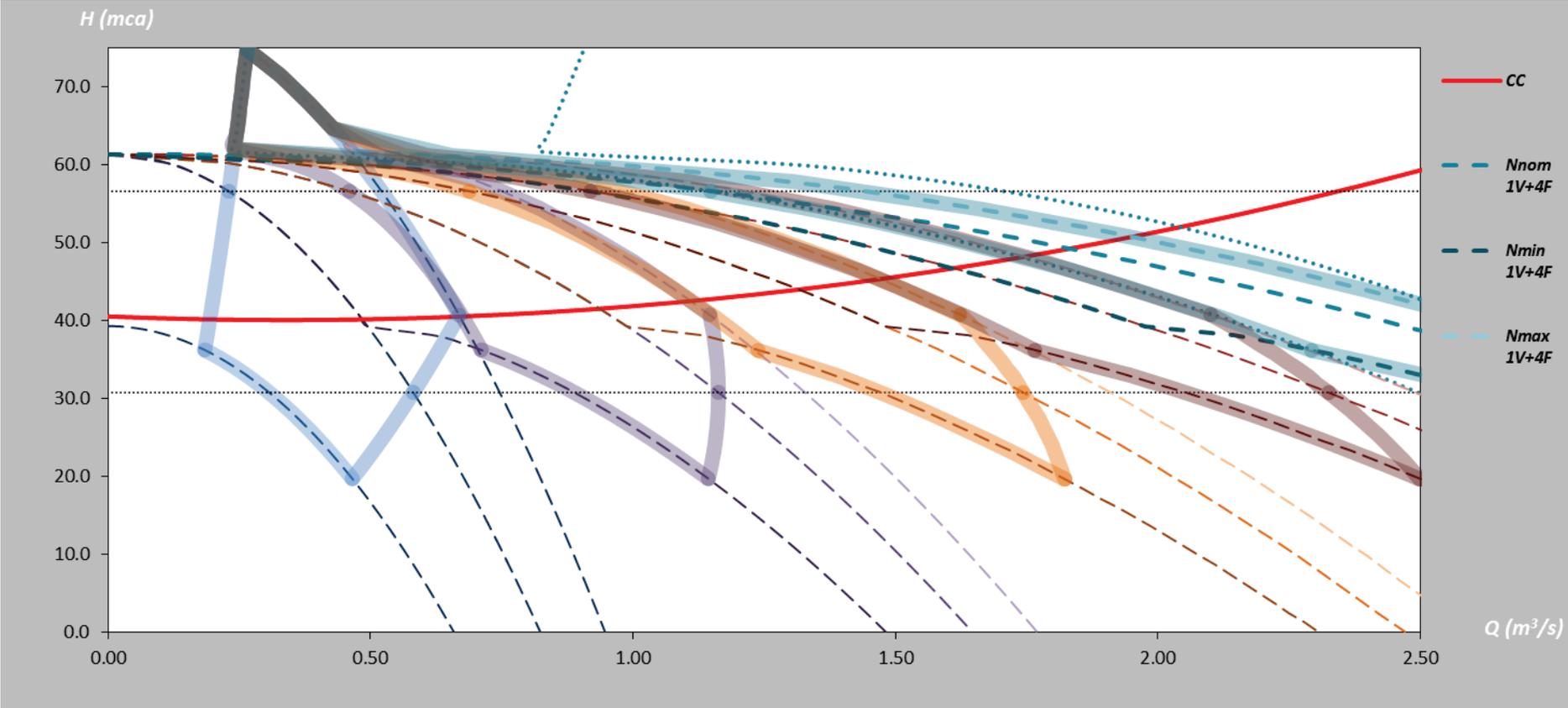
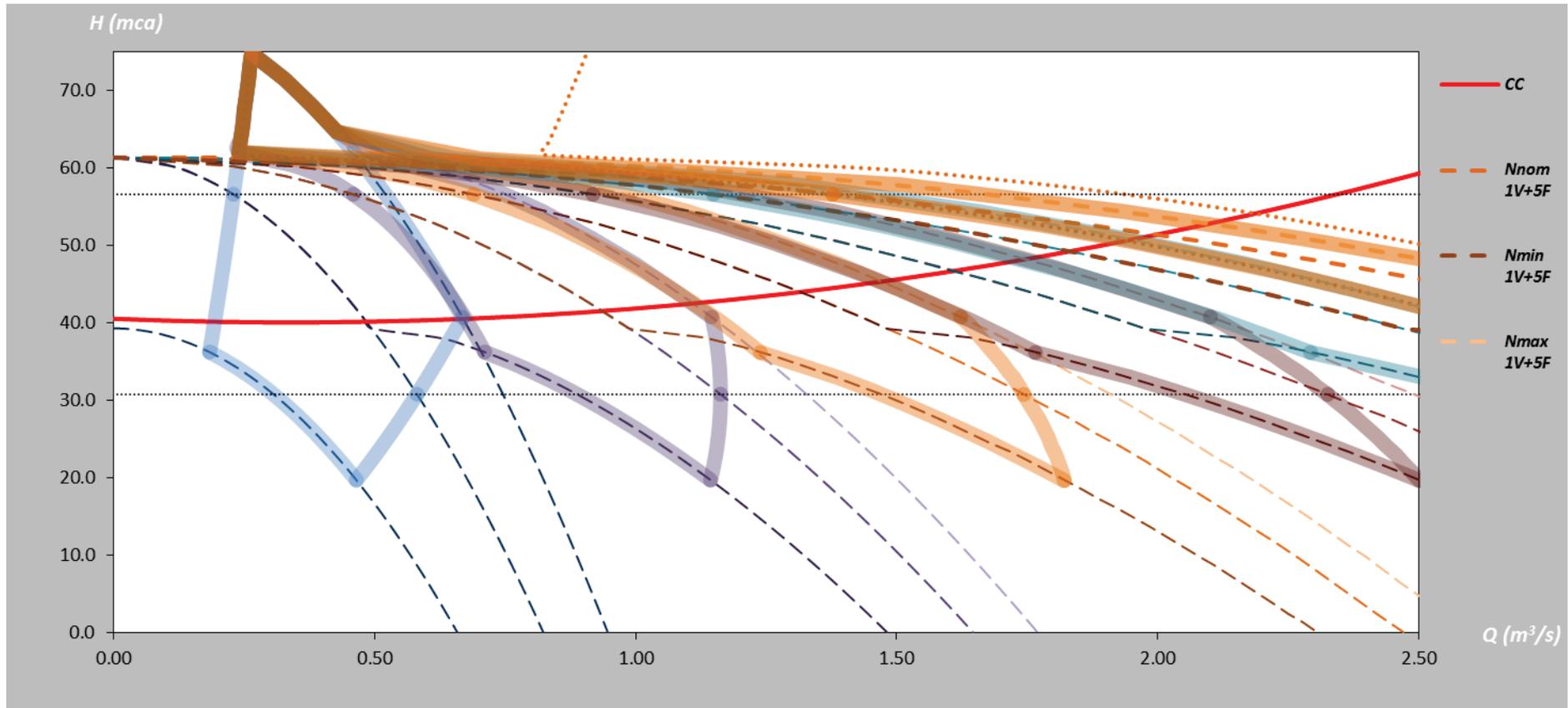


FIGURA 64: ESCENARIO 1V+7F. APILAMIENTO DE LA QUINTA ZONA ÚTIL

Se muestra ahora el apilamiento de la sexta zona útil.



**FIGURA 65: ESCENARIO 1V+7F. APILAMIENTO DE LA SEXTA ZONA ÚTIL**

Se muestra ahora el apilamiento de la séptima zona útil.

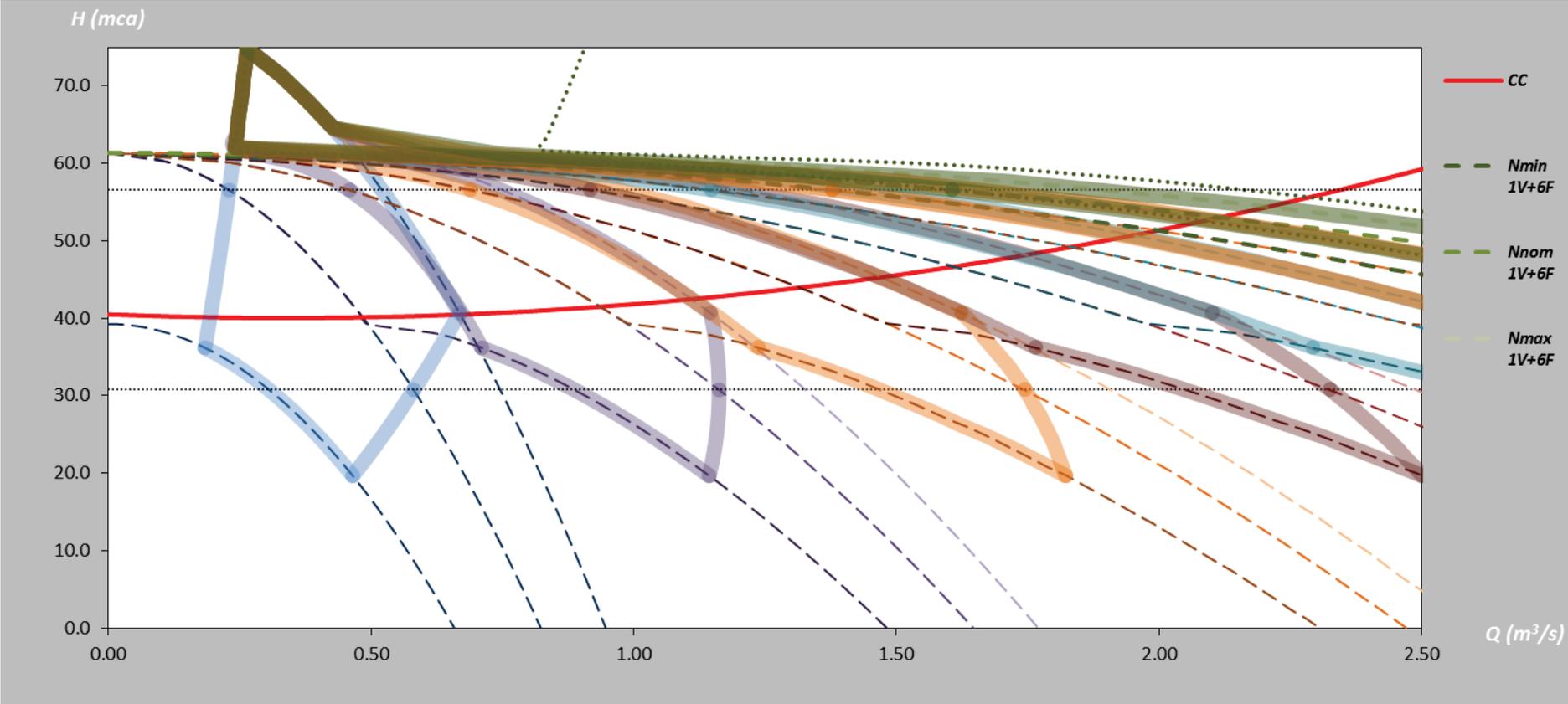
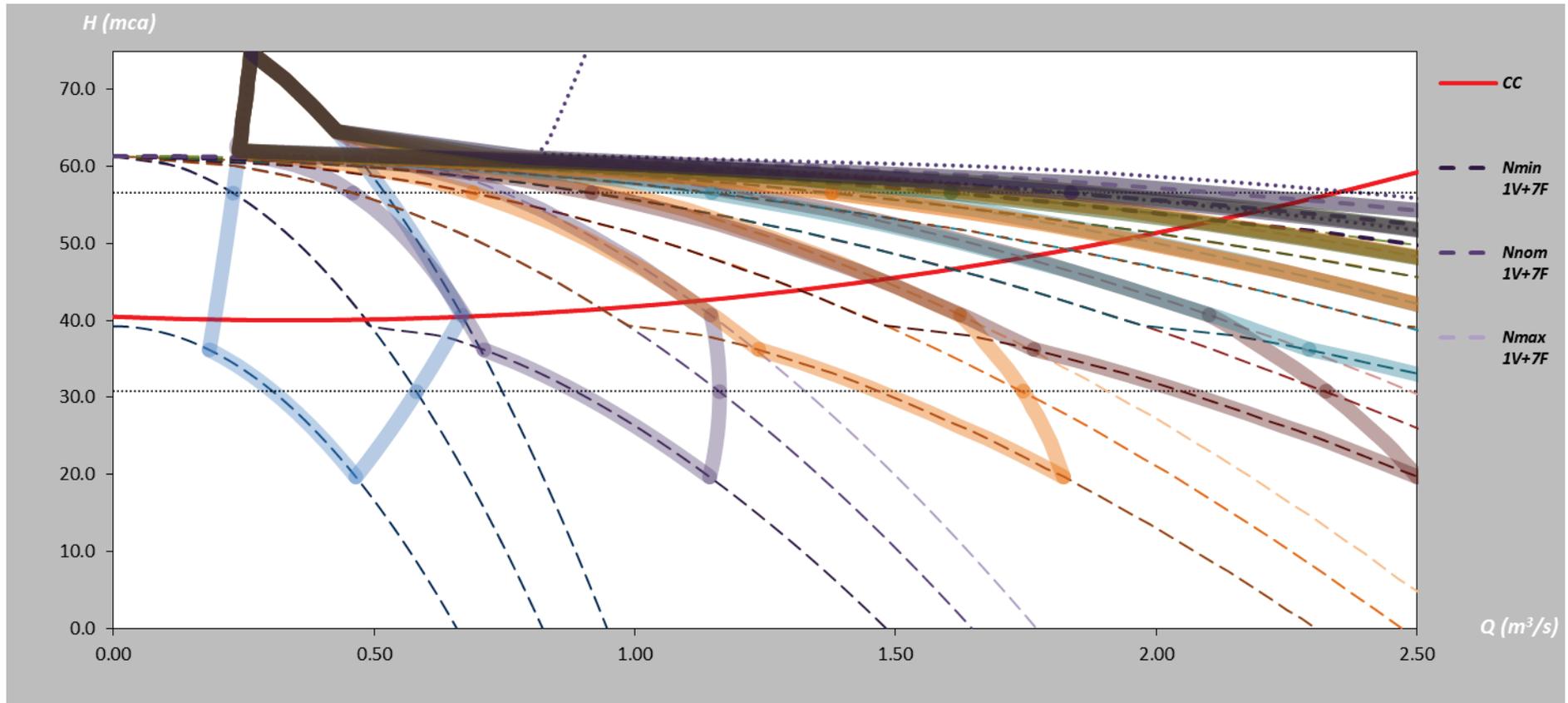


FIGURA 66: ESCENARIO 1V+7F. APILAMIENTO DE LA SÉPTIMA ZONA ÚTIL

Se muestra ahora el apilamiento de la octava zona útil.



**FIGURA 67: ESCENARIO 1V+7F. APILAMIENTO DE LA OCTAVA ZONA ÚTIL**

Vista completa del escenario

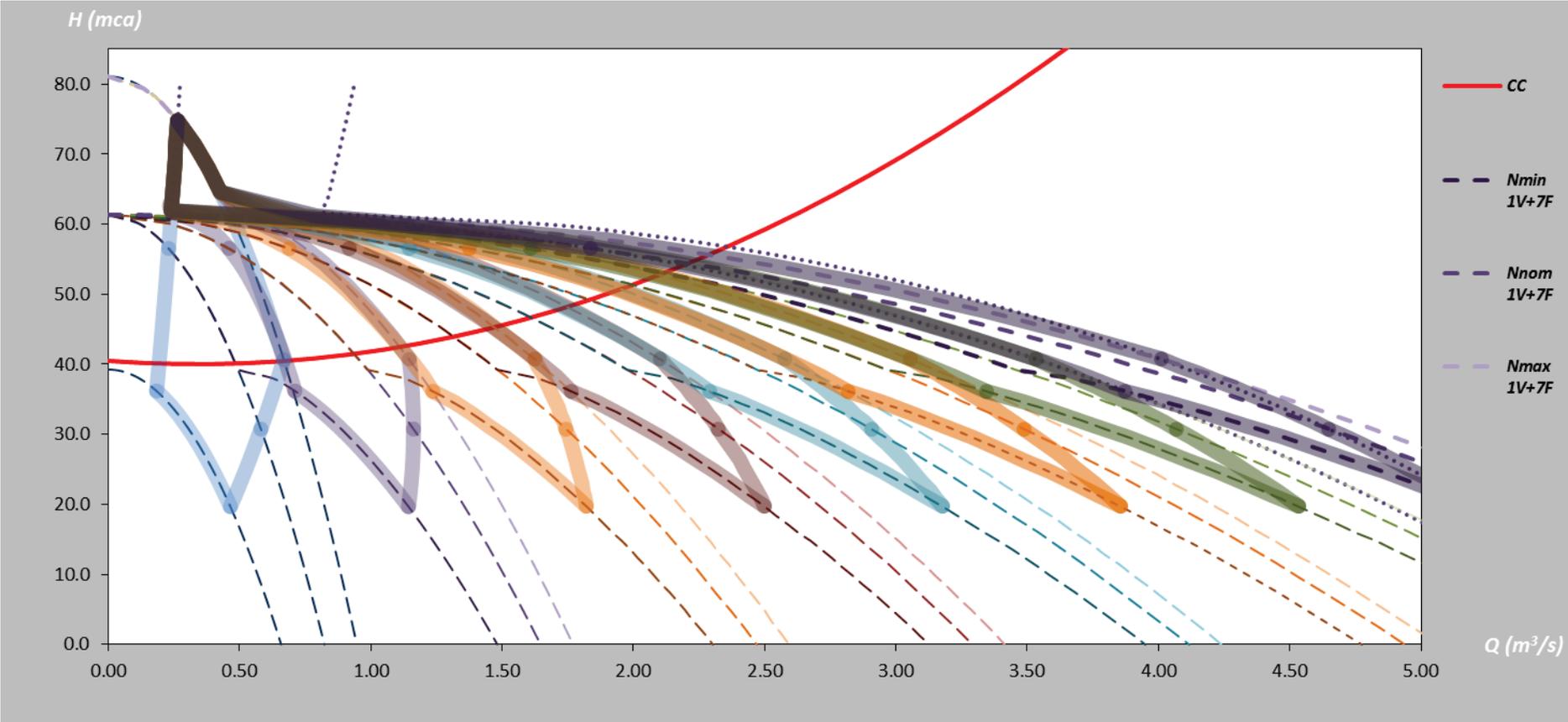


FIGURA 68: ESCENARIO 1V+7F. VISTA COMPLETA DEL ESCENARIO