

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN DE MAESTRÍA

---

**Sistemas de Elevación de Presión como  
Cargas Flexibles en Respuesta de la  
Demanda**

---

*Autor:*  
Cesar DIAZ

*Directores:*  
Dr. Diego PATIÑO  
Dr. Fredy RUIZ

*Tesis presentada como requisito para obtener  
el grado de Magister en Ingeniería Electrónica*

*en el*

Departamento de Ingeniería Electrónica

*Noviembre 2015*



# Índice general

<b>Lista de Figuras</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Tablas</b>	<b>v</b>
<b>Introducción</b>	<b>vii</b>
<b>1. Modelo del sistema elevador de presión de agua</b>	<b>1</b>
1.1. Caso de estudio . . . . .	2
1.2. Modelo físico del sistema . . . . .	3
1.2.1. Tanque presurizado . . . . .	4
1.2.2. Motor . . . . .	5
1.2.3. Bomba centrífuga . . . . .	8
1.3. Simulación del modelo . . . . .	12
1.4. Validación del modelo . . . . .	15
<b>2. Flexibilidad agregada por medio de sistemas elevadores de presión</b>	<b>19</b>
2.1. Respuesta de la demanda . . . . .	19
2.1.1. Seguridad y problema de balance . . . . .	20
2.1.2. Servicios complementarios . . . . .	20
2.2. Modelo dinámico del conjunto agregado . . . . .	22
2.2.1. Desempeño del modelo . . . . .	22
2.2.2. Simplificación del modelo y servicio energético . . . . .	25
2.2.3. Límites de los niveles de operación . . . . .	28
2.3. Sistema de control de reducción de potencia . . . . .	30
2.4. Validación del sistema de control . . . . .	35
<b>3. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>39</b>

# Índice de figuras

1.1. Sistema de Elevación de Presión de Agua (SEPA). Tomada de [1] . . . . .	2
1.2. Circuito equivalente del motor de inducción en su eje d . . . . .	7
1.3. Circuito equivalente del motor de inducción en su eje q . . . . .	7
1.4. Triángulo de velocidades de una bomba centrífuga. Tomada de [2] . . . . .	9
1.5. Curvas características teórica de una bomba centrífuga. Tomada de [2] . . . . .	11
1.6. Diagrama de bloques del sistema de elevación de presión de agua (SEPA)	13
1.7. Diagrama de bloques del bloque Motor . . . . .	14
1.8. Diagrama de bloques del bloque Hidráulica . . . . .	14
1.9. Medición de potencia y caudal en Cuarto de Bombas, Edificio Maldonado de la PUJ . . . . .	15
1.10. Caudal medido en cuarto de bombas . . . . .	16
1.11. Simulación de la presión de aire en el tanque . . . . .	17
1.12. Potencia medida (azul) y simulada del modelo (roja) . . . . .	18
2.1. Respuesta de los servicios ante una contingencia coordinada o una pérdida repentina de la generación . . . . .	21
2.2. Potencia consumida por el SEPA al variar presión máxima y mínima, para caudal alto, medio y bajo . . . . .	23
2.3. Ciclo útil del encendido del SEPA al variar presión máxima y mínima, para caudal alto, medio y bajo . . . . .	24
2.4. Frecuencia de encendido del SEPA al variar presión máxima y mínima, para caudal alto, medio y bajo . . . . .	25
2.5. Diagrama de bloques del sistema SEPA, con bloque Bomba Centrífuga simplificado . . . . .	25
2.6. Diagrama de bloques del nuevo bloque Bomba Centrífuga (Modelo simplificado) . . . . .	26
2.7. Tiempo que demoran los SEPA en volver a encender después de un cambio en el punto de operación . . . . .	27
2.8. Diagrama de bloques del sistema de control de reducción de potencia . . . . .	30
2.9. Diagrama de bloques del bloque Control . . . . .	31
2.10. Diagrama de bloques del bloque Planta . . . . .	32
2.11. Respuesta paso de la planta del modelo calculado (Azul) y planta con los 100 SEPA (Roja) . . . . .	33

2.12. Cantidad de sistemas en la activación de flexibilidad para respuesta de la demanda . . . . .	36
2.13. Reducción de potencia en el plan RD . . . . .	37
2.14. Potencia consumida las tres horas de la prueba . . . . .	37

## Índice de cuadros

1.1. Características del SEPA del Edificio Maldonado y del Edificio Barón . .	3
1.2. Nomenclatura de las variables usadas en el modelo del tanque presurizado	4
1.3. Nomenclatura de las variables usadas en el modelo del motor . . . . .	6
1.4. Nomenclatura de las variables usadas en el modelo de la bomba centrífuga	9
1.5. Parámetros físicos en la simulación . . . . .	12
1.6. Parámetros ajustados para la simulación . . . . .	12
2.1. Presiones evaluadas en el desempeño del modelo . . . . .	23
2.2. Valores mínimos y máximos de los valores aleatorios para las variables en la simulación . . . . .	27
2.3. Variables de presión definidas para el análisis de flexibilidad . . . . .	29



# Introducción

En búsqueda de mejorar la eficiencia energética, ha surgido el concepto de red inteligente (*Smart Grid*), el cual concibe a la red eléctrica como un sistema que interactúa de forma dinámica con generadores, distribuidores y usuarios. Estos actores del sistema son entes dinámicos, capaces de reaccionar ante distintas eventualidades; por ejemplo, ante una situación de demanda cercana a los límites de seguridad, los clientes reducen su consumo, manual o automáticamente, de forma que se disminuya el riesgo de falla [3]. Estas acciones son posibilidades que ofrecen los planes de respuesta de la demanda.

En respuesta de la demanda se aprovecha la flexibilidad de programación de las cargas, las cuales se encienden o se apagan. Las cargas que pueden ser encendidas o apagadas remotamente se pueden clasificar en: las que generan incomodidad para el usuario, como por ejemplo, apagar las luces o el aire acondicionado, o las que son desapercibidas por el usuario, como el cargador de la batería de un carro eléctrico en la noche. Para manejar la flexibilidad de las cargas, se deben conocer parámetros de mínimos y máximos en cuanto a consumo, cuánta energía necesita y en qué momento, limitaciones de número de veces que se puede encender y apagar, y entre qué tiempos se puede hacer [4]. En los mercados de energía existen diferentes tipos de servicios complementarios, que pueden ser suministrados desde la generación o la demanda. Los servicios prestados por la demanda pueden tener en cuenta las limitaciones de la carga así como su capacidad de velocidad de respuesta y precisión. La característica principal de estos servicios complementarios se explica en [4] y radica en la escala de tiempo en la cual se realiza el control.

Evaluando los temas relacionados con la respuesta de la demanda, nace la idea de analizar en qué condiciones energéticas se encuentra Colombia, obteniendo que para un usuario de energía eléctrica en Colombia los costos de suministro son mucho menores si realizan los consumos en los periodos de demanda mínima, y también que los costos

de suministro son mucho mayores si los consumos se realizan en los periodos de demanda máxima [5]. Por otra parte, se observa que el número de usuarios conectados a los sistemas eléctricos nacionales ha estado creciendo a una tasa promedio anual de 4,7% [6], lo cual refleja un constante crecimiento de la demanda eléctrica. Así mismo, se calculó que los usuarios generaron un consumo a nivel nacional que fue dividido en los siguientes sectores: residencial 44%, industrial 32%, comercial 17%, oficial 4% y otros como alumbrado público 3% [7]. Estos datos exponen la importancia de investigar en el sector energético nacional, con mayor énfasis en el sector residencial y buscar nuevas soluciones para mejorar la eficiencia y confiabilidad de la red eléctrica.

Gracias a la Ley 1715 del 21 de Mayo de 2014, se promueve en Colombia la integración de energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, que decreta en el capítulo V, Artículo 31. *Respuesta de la demanda*, que se delega a la CREG para que establezca mecanismos regulatorios para incentivar la respuesta de la demanda [8]. Por lo tanto, se encuentra una oportunidad de investigación en la demanda del consumo de los Sistemas de Elevación de Presión de Agua (SEPA) en edificios. De igual forma, realizando una revisión del estado del arte, no se encuentran reportes que modelen éstos sistemas como cargas flexibles. Por otra parte, los sistemas que se suelen modelar como cargas flexibles son los que involucran termostatos, y son fuertemente utilizados en países como Estados Unidos. Algunos desarrollos con termostatos se analizan en [9] y en [10], en los cuales se modela el sistema y por medio de variaciones en el punto de operación de la temperatura, logran prestar servicios eléctricos a la red por medio de respuesta de la demanda.

Los edificios de grandes alturas presentan retos importantes en el bombeo de agua para los pisos superiores. El sistema más común para tal fin desde los años cincuenta son los sistemas con tanques a presión neumática (hidroneumáticos), que remplazaron muchas de las soluciones de tanque en la azotea. Hoy en día, los sistemas de presurización de agua brindan ventajas en opciones de bombeo y control, que resuelven problemas y proveen ahorros en espacio y en consumo de energía [11].

Las bombas hidráulicas tienen un papel fundamental en los sistemas de elevación de presión a la hora de abastecer de agua los edificios, ya que son las responsables de entregar el caudal necesario para suministrar el agua hasta el artefacto ubicado en el punto más desfavorable del edificio. Así mismo, el tanque presurizado es de gran importancia puesto que sirve para mantener la presión constante en las tuberías de aguas blancas dentro

del edificio. El desempeño de estos tanques se basa en el principio de compresibilidad o elasticidad del aire cuando es sometido a presión [12]. Como el funcionamiento de las bombas y el tanque están directamente relacionados con el consumo de agua del edificio, se utiliza un sistema de control tal que satisface la demanda de agua de manera continua y permanente. En general, el diseño de estos sistemas se basa en el control de dos posiciones, mediante presostatos o mediante un variador de frecuencia [13].

La presente investigación tiene como objetivo *”Determinar la capacidad de los sistemas de elevación de presión en edificaciones para su uso como cargas flexibles en respuesta de la demanda”*. Por lo cual, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Construir un modelo dinámico del sistema de elevación de presión de agua, basado en datos experimentales.
- Definir en qué tipo de servicio eléctrico se adaptan los sistemas de elevación de presión de agua como cargas flexibles.
- Proponer una estrategia de control automático para el manejo las cargas flexibles en respuesta de la demanda.
- Validar en simulación la estrategia de control en parámetros como el tiempo de respuesta, capacidad de desplazar el consumo energético en el tiempo y la reducción del pico de demanda.

Por lo tanto, el aporte de la investigación se refleja en tres aspectos. Primero, se define la flexibilidad del consumo de potencia de los SEPA, por medio de la variación de los límites de operación de la presión del tanque presurizado. Segundo, se define el servicio energético que pueden prestar los SEPA a la red eléctrica, en momentos en los cuales exista una sobrecarga en la red de distribución eléctrica. Tercero, se expone una estrategia de control para la agregación y desagregación de los sistemas de elevación de presión en momentos de contingencia en la red eléctrica.

El presente documento está dividido en tres capítulos. El Capítulo 1, expone el desarrollo de modelo matemático del sistema, teniendo en cuenta el motor, la bomba centrífuga y el tanque presurizado, para luego ser implementado en simulación. El Capítulo 2, explica el servicio energético que puede prestar el SEPA, para luego mostrar el control propuesto, el cual tiene el fin de responder ante una solicitud de reducción de consumo

por parte del operador del sistema eléctrico, lo cual se realiza con varios sistemas como cargas flexibles. Por último, el Capítulo 3, expone las conclusiones y trabajos futuros de la presente investigación.

# Capítulo 1

## Modelo del sistema elevador de presión de agua

Con el objetivo de determinar el potencial de los SEPA para su uso como cargas flexibles, se hace necesario construir un modelo que muestre la dinámica del sistema. Por tal razón, el presente capítulo expone el modelo matemático de un SEPA, calculado a partir de datos experimentales. En el capítulo, se empieza explicando el funcionamiento general del sistema y se expone el caso de estudio, para luego modelar matemáticamente el SEPA y validarlo bajo la comparación de datos reales y los adquiridos en simulación.

Los SEPA mantienen la presión constante en las tuberías de aguas blancas dentro de una casa, oficina o edificio. Estos sistemas trabajan bajo el principio de compresibilidad o elasticidad del aire cuando es sometido a presión. Permiten que el líquido salga a la presión y flujo adecuado, sin importar la distancia a la que se encuentren los equipos y artefactos que demandan agua [12].

En la Figura 1.1, tomada de [1], se muestra el SEPA. El sistema opera de la siguiente forma, cuando el agua suministrada desde el acueducto público u otra fuente (acometida) pasa por la bomba centrífuga y ( $Q_b$ ) entra al tanque de presión, aumenta el nivel de agua, lo cual comprime el aire y aumenta la presión del mismo. Cuando la presión del aire llega a un nivel determinado ( $p_{max}$ ), se produce una señal de parada al motor de la bomba ( $\omega = 0$ ), y el tanque queda en la capacidad de abastecer la red ( $Q_{out}$ ). Cuando los niveles de presión bajan a los mínimos preestablecidos ( $p_{min}$ ), se acciona el mando de encendido al motor de la bomba. Este ciclo se repite en toda la operación. Por lo tanto,

la presión varía entre  $p_{min}$  y  $p_{max}$ , y el motor de la bomba prende y apaga continuamente [1].

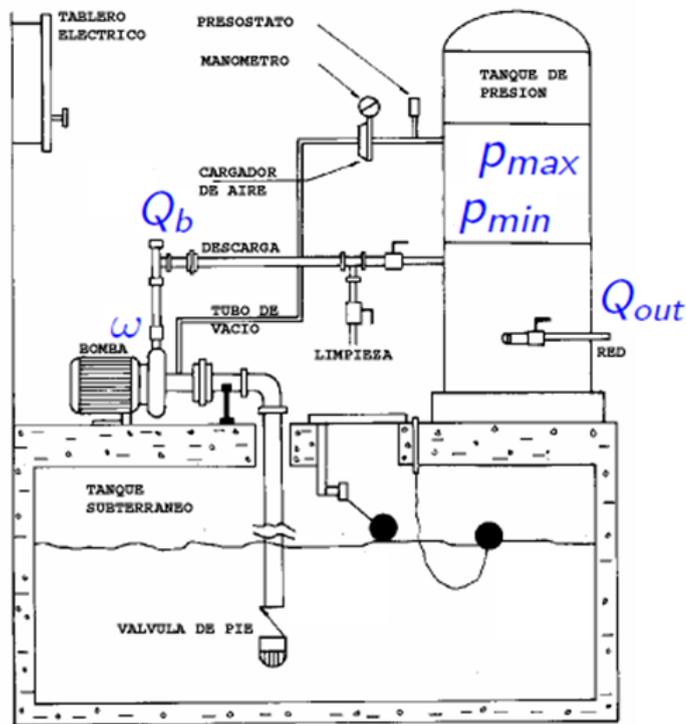


FIGURA 1.1: Sistema de Elevación de Presión de Agua (SEPA). Tomada de [1]

## 1.1. Caso de estudio

Para el desarrollo de modelo dinámico del SEPA es necesario conocer el comportamiento de variables como, potencia consumida, caudal que entrega la bomba y presiones  $p_{min}$  y  $p_{max}$ , en el transcurso de la operación del sistema. Por lo tanto, se realizó una toma de datos de los SEPA del Cuarto de Bombas del Edificio Maldonado y del Edificio Barón de la Pontificia Universidad Javeriana (PUJ). En estas pruebas se midió:

- Potencia consumida por la bomba con el Analizador de línea Fluke 43B.
- Caudal a la salida de bomba con el medidor ultrasónico FE FSC S20A1-10Y.
- Presiones de conmutacion en el tanque por medio del manómetro instalado en el sistema.

El Cuadro 1.1 muestran las características del SEPA de cada edificio.

CUADRO 1.1: Características del SEPA del Edificio Maldonado y del Edificio Barón

<b>Variable</b>	<b>Ed. Maldonado</b>	<b>Ed. Barón</b>	<b>Unidades</b>
Volumen del tanque	200	500	L
Presión $p_{min}$	1.52	3.79	bar
Presión $p_{max}$	2.90	5.17	bar
Presión precarga en el tanque	1.24	3.65	bar
Potencia del motor	1491	3729	W
Velocidad angular del motor	366.45	364.36	rad/s
Par de polos del motor	2	2	-

Los resultados de las variables medidas se utilizan al final de capítulo con el fin de validar el modelo desarrollado. Por otra parte, con la toma de datos se encontró que el SEPA del Edificio Maldonado realiza aproximadamente 10 ciclos (encendido-apagado) en una hora, y que el tiempo que permanece encendido es en promedio 90 segundos por ciclo; mientras que el sistema del Edificio Barón, realiza aproximadamente 26 ciclos por hora, y en promedio permanece encendido 30 segundos por ciclo. Esto se debe a que el SEPA del Edificio Barón cuenta con un tanque de mayor volumen, sus niveles de presión son más altos y a que el sistema suministra agua a pisos mas elevados.

## 1.2. Modelo físico del sistema

Teniendo en cuenta las características de los SEPA descritos en la sección anterior (Ver Cuadro 1.1), y por medio de las ecuaciones físicas del sistema, es posible plantear un modelo matemático que describe la dinámica del SEPA.

El modelo matemático de un SEPA se puede dividir en tres partes fundamentales que describen todo el proceso de transformación de la energía eléctrica a energía mecánica hasta la conversión a energía hidráulica. Los tres elementos fundamentales son: el tanque presurizado, el motor de inducción (eléctrica) y la bomba centrífuga.

### 1.2.1. Tanque presurizado

Para desarrollar el modelo dinámico correspondiente al tanque presurizado se usan las variables que se muestran en el Cuadro 1.2.

CUADRO 1.2: Nomenclatura de las variables usadas en el modelo del tanque presurizado

Simbolo	Descripción
$p_{aire}$	Presión del aire en el tanque
$p_a$	Presión atmosférica
$p_{pr}$	Presión de precarga en el tanque
$n$	Moles de aire
$R$	Constante universal de los gases ideales
$T_{aire}$	Temperatura en el tanque
$V_T$	Volumen Total del tanque
$V_{agua}$	Volumen de agua en el tanque
$V_{aire}$	Volumen de aire en el tanque
$V_{A-in}$	Volumen de agua de entrada al tanque
$\gamma$	Relación de calor específico

En el planteamiento del modelo se usa la Ley de los gases ideales, expresada en la ecuación (1.1).

$$p * V = n * R * T \quad (1.1)$$

Cuando se usan unidades SI en la anterior ecuación, la presión es dada en pascales, el volumen en metros cúbicos, la temperatura en kelvin y los moles en cantidad, mientras que  $R$  se obtiene en joules por kelvin por mol,  $R = 8,314 J * K^{-1} * mol^{-1}$ . Con lo anterior, la ecuación para el tanque presurizado es:

$$p_{aire} * V_{aire} = n * R * T_{aire} \quad (1.2)$$

donde  $n$  y  $R$  son constantes y  $T_{aire}$  se asume constante debido a que no hay intercambio de calor. El volumen total del tanque consta del volumen de agua y el volumen de aire, los cuales son divididos físicamente por una membrana. Su expresión matemática se

muestra en la ecuación (1.3). Así mismo, la presión de aire en el tanque se describe en la ecuación (1.4).

$$V_T = V_{aire} + V_{agua} \quad (1.3)$$

$$p_{aire} = \frac{n * R * T_{aire}}{V_T - V_{agua}} \quad (1.4)$$

Por lo tanto, usando las ecuaciones de los gases ideales, es posible determinar la expresión general de la ecuación (1.5), y plantear la relación entre la presión de aire y el volumen total del tanque en la ecuación (1.6).

$$p * V^\gamma = cte = V * p^{1/\gamma} \quad (1.5)$$

$$(p_{aire} + p_a)^{1/\gamma} * (V_T - V_{A-in}) = (p_{pr} + p_a)^{1/\gamma} * V_T \quad (1.6)$$

Donde, el lado izquierdo de la igualdad hace referencia a la participación del aire dentro del tanque, mientras que el lado derecho hace referencia a la capacidad total del tanque (sin agua). Entonces, despejando  $V_{A-in}$  se obtiene:

$$V_{A-in} = V_T \left( 1 - \left( \frac{p_{pr} + p_a}{p_{aire} + p_a} \right)^{1/\gamma} \right) \quad (1.7)$$

Con lo anterior es posible calcular las variaciones en el volumen de agua en el tanque, que depende del caudal de entrada y salida del tanque.

$$\dot{V}_{agua} = \frac{V_{A-in}}{t} - Q_{out} \quad (1.8)$$

### 1.2.2. Motor

El siguiente modelo se basa en la tesis doctoral presentada en [15], y usan las variables que se muestran en el Cuadro 1.3.

CUADRO 1.3: Nomenclatura de las variables usadas en el modelo del motor

Simbolo	Descripción
$\psi_{qs}$	Flujo del estator en el eje q
$\psi_{ds}$	Flujo del estator en el eje d
$\psi'_{qr}$	Flujo del rotor en el eje q
$\psi'_{dr}$	Flujo del rotor en el eje d
$L_s$	Inductancia del estator
$L'_r$	Inductancia del rotor
$L_m$	Inductancia mutua
$R_s, L_{ls}$	Resistencia e inductancia de fuga del estator
$R'_r, L'_{lr}$	Resistencia e inductancia de fuga del rotor
$i_{qs}, V_{qs}$	Corriente y voltaje del estator en el eje q
$i_{ds}, V_{ds}$	Corriente y voltaje del estator en el eje d
$i'_{qr}, V'_{qr}$	Corriente y voltaje del rotor en el eje q
$i'_{dr}, V'_{dr}$	Corriente y voltaje del rotor en el eje d
$J$	Momento de inercia del rotor y el impulsor
$T_e$	Torque electromagnético
$T_L$	Torque de carga
$t$	Tiempo
$P$	Par de polos del motor

En el presente modelo, el motor se alimenta con un voltaje trifásico AC con una frecuencia constante  $\omega_e$  que pone tres voltajes en cada fase, en el inductor del estator del motor y se modela utilizando las ecuaciones (1.9), (1.10) y (1.11).

$$V_{as} = V_m \cos(\omega_e t) \quad (1.9)$$

$$V_{bs} = V_m \cos(\omega_e t + \theta) \quad (1.10)$$

$$V_{cs} = V_m \cos(\omega_e t - \theta) \quad (1.11)$$

El motor de inducción trifásico funciona como un convertidor de energía eléctrica en energía mecánica que ejerce el par electromagnético para la bomba centrífuga. El motor

de inducción se modela utilizando la transformación de Park o D-Q, que convierte las componentes  $'abc'$  del sistema trifásico a otro sistema de referencia  $'dq0'$ . El circuito equivalente del sistema de referencia  $'dq0'$  se muestra en la Figura 1.2 y en la Figura 1.3.

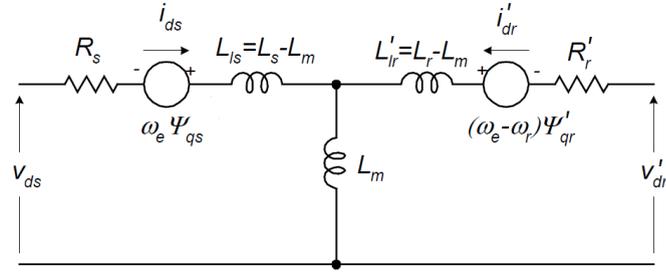


FIGURA 1.2: Circuito equivalente del motor de inducción en su eje d

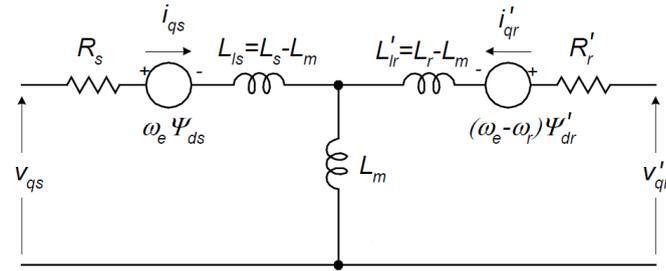


FIGURA 1.3: Circuito equivalente del motor de inducción en su eje q

El modelo del motor de inducción trifásico puede ser formulado como se muestra en las ecuaciones (1.12) a (1.21).

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \quad (1.12)$$

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \quad (1.13)$$

$$\psi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \quad (1.14)$$

$$\psi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \quad (1.15)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (1.16)$$

$$L'_r = L'_{lr} + L_m \quad (1.17)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} + \omega_e \psi_{ds} \quad (1.18)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} - \omega_e \psi_{qs} \quad (1.19)$$

$$V_{qr}' = R_r' i_{qr}' + \frac{d}{dt} \psi_{qr}' + (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr}' \quad (1.20)$$

$$V_{dr}' = R_r' i_{dr}' + \frac{d}{dt} \psi_{dr}' - (\omega_e - \omega_r) \psi_{qr}' \quad (1.21)$$

Para este modelo  $V_{dr}$  y  $V_{qr}$  se tomarán iguales a cero dado que se realiza para un motor de inducción de jaula de ardilla.

$$V_{dr} = 0 \quad (1.22)$$

$$V_{qr} = 0 \quad (1.23)$$

El par electromagnético generado se modela como:

$$T_e = \frac{3}{2} * \frac{P}{2} L_m (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) \quad (1.24)$$

La velocidad de rotación del rotor se calcula utilizando la segunda ley de Newton de acuerdo con:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P}{2J} (T_e - T_L) \quad (1.25)$$

El consumo de energía eléctrica se puede escribir como:

$$P_e = \sqrt{3} V I \cos \varphi \quad (1.26)$$

### 1.2.3. Bomba centrífuga

Para definir el modelo de la bomba centrífuga se usan las variables que se muestran en el Cuadro 1.4.

El elemento principal de una bomba centrífuga es el rodete. En la Figura 1.4, tomada de [2], se puede observar el rodete con los álabes dispuestos según una sección perpendicular al eje de la bomba. Éste opera cuando el líquido llega a la entrada del rodete, en dirección normal al plano de la figura (dirección axial) y cambia a dirección radial recorriendo el espacio o canal delimitado entre los álabes.

CUADRO 1.4: Nomenclatura de las variables usadas en el modelo de la bomba centrífuga

Simbolo	Descripción
$Q$	Caudal
$\rho$	Densidad del líquido
$g$	Gravedad
$r_1, r_2$	Radio de entrada y salida del impulsor
$H$	Altura producida por la bomba
$t$	Tiempo
$P$	Par de polos del motor

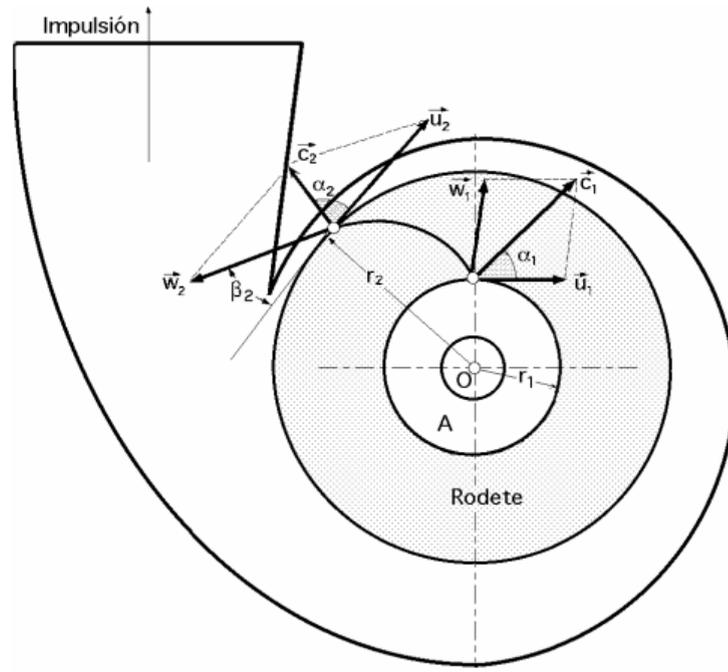


FIGURA 1.4: Triángulo de velocidades de una bomba centrífuga. Tomada de [2]

El líquido queda sometido a una velocidad relativa  $w$  a su paso por el espacio entre álabes, entre la entrada y la salida, y a una velocidad de arrastre  $u$  debida a la rotación del rodete alrededor del eje. La suma vectorial de estas velocidades proporcionan la velocidad absoluta  $c$ . Ahora, se obtienen el triángulo de velocidades a la entrada, a partir de  $w_1$  la velocidad relativa del líquido a la entrada en la cámara delimitada por

un par de álabes,  $u_1$  la velocidad tangencial, y  $c_1$  la velocidad absoluta. Siendo  $\alpha_1$  el ángulo formado por  $c_1$  y  $u_1$ , y  $\beta_1$  el formado por  $w_1$  y  $u_1$ . A la salida del rodete se tiene otro triángulo de velocidades  $w_2$ ,  $u_2$  y  $c_2$  que determinan los ángulos  $\alpha_2$  el ángulo formado por  $c_2$  y  $u_2$ , y  $\beta_2$  el formado por  $w_2$  y  $u_2$ .

Por otro lado, para calcular el torque se aplica el Segundo Teorema de Euler, que dice que el incremento del momento de la cantidad de movimiento del líquido contenido entre los álabes, para un caudal  $Q$  impulsado, con relación al eje de giro, tiene que ser igual al momento con relación a dicho eje, de las fuerzas ejercidas por los álabes sobre el líquido, se tiene:

$$T = \frac{\rho Q}{g}(c_2 r_2 \cos \alpha_2 - c_1 r_1 \cos \alpha_1) \quad (1.27)$$

Si  $P_w$  es la potencia aplicada al eje de la bomba, se puede poner en función del torque del motor  $T$  y de la velocidad angular  $w$  de la bomba en la forma:

$$P_w = Tw = \frac{\rho Q}{g} w (c_2 r_2 \cos \alpha_2 - c_1 r_1 \cos \alpha_1) \quad (1.28)$$

$$P_w = \frac{\rho Q}{g} (c_2 u_2 \cos \alpha_2 - c_1 u_1 \cos \alpha_1) = \rho Q H \quad (1.29)$$

Despejando  $H$ , se obtiene la ecuación general de las bombas centrífugas:

$$H = \frac{c_2 u_2 \cos \alpha_2 - c_1 u_1 \cos \alpha_1}{g} \quad (1.30)$$

La curva característica de una bomba centrífuga es de la forma que se muestra en la ecuación (1.31), que relaciona el caudal  $Q$  con la altura manométrica  $H_t$ .

$$H_m = H_t - \Delta_i = A - BQ - \Delta_i \quad (1.31)$$

La variable  $\Delta_i$  representa las pérdidas de carga interiores. Los coeficientes  $A$  y  $B$  son calculados en [2], obteniendo:

$$A = \frac{u_2^2}{g}; \quad B = \frac{u_2}{k_2 g \omega_2} \cot g \beta_2 \quad (1.32)$$

Si se representan las pérdidas de carga interiores de la bomba  $\Delta_i$  en función de los caudales  $Q$ , se obtiene que la ecuación característica es:

$$H_m = A - BQ - CQ^2 \tag{1.33}$$

En la ecuación (1.33),  $C$  representa el mínimo de pérdidas de carga interiores  $\Delta_i$ . Por lo tanto, su representación gráfica mostrada en la Figura 1.5, tomada de [2], se obtiene restando las pérdidas internas de la altura total para cada caudal  $Q$ . Hay que tener presente que para  $Q = 0$  las pérdidas de carga internas no son nulas, pues aunque la tubería de impulsión esté cerrada, el caudal es nulo, los álabes seguirán girando y en consecuencia producirán rozamientos que implican pérdidas de carga.

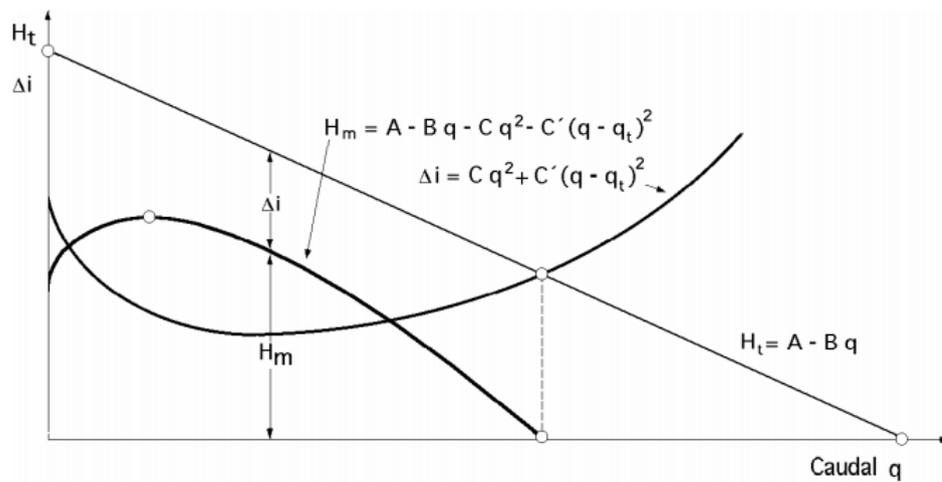


FIGURA 1.5: Curvas características teórica de una bomba centrífuga. Tomada de [2]

Con el desarrollo matemático realizado en cada elemento del SEPA, se definen los parámetros que son usados en simulación de la siguiente forma, se define trabajar con los datos del Edificio Maldonado debido a que los ciclos son menores y esto ayuda al análisis del modelo. Los parámetros utilizados para el modelo del SEPA son tomados del SEPA del Cuarto de bombas del Edificio Maldonado (Ver Cuadro 1.1), y se muestran en el Cuadro 1.5. Por otra parte, debido a que en las hojas de especificaciones de las bombas centrífugas no se encuentran todos los parámetros necesarios para el modelo, algunos datos como el radio de entrada y salida del impulsor, se tomaron de [16], los cuales fueron ajustados en simulación con el fin de obtener un comportamiento dinámico equivalente al del SEPA real, estos parámetros se muestran en el Cuadro 1.6.

CUADRO 1.5: Parámetros físicos en la simulación

Simbolo	Valor	Unidades
$p_{pr}$	1.38	bar
$V_T$	200	L
$\rho$	1000	$kg/m^3$
$g$	9.8	$m/s^2$
$P$	2	-

CUADRO 1.6: Parámetros ajustados para la simulación

Simbolo	Valor	Unidades
$L_m$	0.2037	H
$R_s$	1.115	ohm
$L_s$	0.005974	H
$J$	0.002	$kgm^2$
$A$	751.64	$Pa/(kg/m^3)$
$B$	55872	$Pa * s/kg$
$C$	1.097e7	$Pa * s^2/(kg/m^3)$

### 1.3. Simulación del modelo

Con los parámetros del Cuadro 1.5 y las ecuaciones planteadas en el modelo del SEPA, se lleva a cabo la simulación del sistema en el software MATLAB y en la herramienta *Simulink*. La Figura 1.6, muestra diagrama de bloques general del SEPA, con los bloques Bomba Centrífuga que contiene al bloque Motor y al bloque Hidráulica. El diagrama de bloques del SEPA también incluye los bloques Tanque Presurizado, Control ON/OFF y Fuente hidráulica. El Tanque Presurizado es simulado con la herramienta *Gas-Charged Accumulator* que se basa en las ecuaciones (1.5) a (1.7) del modelo descrito anteriormente.

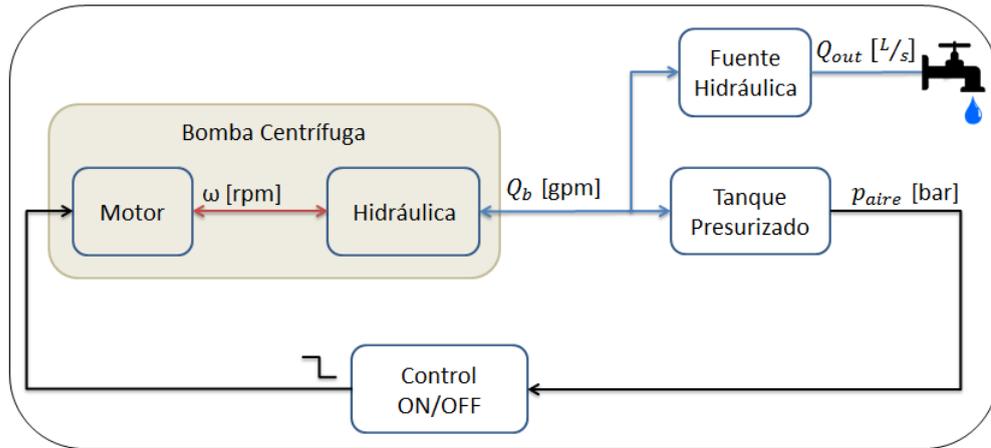


FIGURA 1.6: Diagrama de bloques del sistema de elevación de presión de agua (SEPA)

En el diagrama, a la salida del bloque Motor se muestra una señal de color rojo que representa la velocidad angular  $w$  en  $rpm$  generada por el motor, la cual es entregada al subsistema “Hidráulica”; esta señal es bidireccional debido a que el subsistema “Hidráulica” genera un efecto de carga sobre el motor. A la salida del bloque Bomba Centrífuga, se tiene una señal de color azul que representa el caudal de agua  $Q_b$  en  $gpm$  suministrado por la bomba tanto al Tanque Presurizado, como a una Fuente Hidráulica que es controlada por una señal que simula el caudal de demanda  $Q_{out}$  en  $L/s$  del edificio. A la salida del bloque Tanque presurizado se tiene una señal de color negro que representa la medición de la presión de aire  $p_{aire}$  en  $bar$  en el tanque, por medio de un manómetro. Con esta señal se controla el encendido y el apagado del motor por medio del Control ON/OFF, el cual entrega una señal binaria y tiene configurado el límite mínimo y máximo del nivel de presión para su operación.

Para la simulación del bloque Motor se utiliza el *toolbox SymPowerSystems*. En la Figura 1.7, se muestra el diagrama de bloques del bloque Motor, en el cual, existe un voltaje trifásico que representa la alimentación eléctrica de la red, la cual pasa por un Reductor de pico y llega a un interruptor que es controlado por la señal ON/OFF enviada desde el controlador. Cuando el interruptor está cerrado, permite que fluya energía al Motor Asíncrono trifásico, el cual es simulado con la herramienta *Asynchronous Machine* que se basa en las ecuaciones (1.12) a (1.21) del modelo descrito anteriormente. Por lo tanto, a la salida del motor asíncrono, se tiene la velocidad angular ( $w$ ) en  $rpm$  que es entregada al subsistema Hidráulica de la bomba centrífuga. En el diagrama también se observa que

se realizan mediciones de la potencia y energía consumida por el motor, las cuales son útiles en el momento de la validación de modelo.

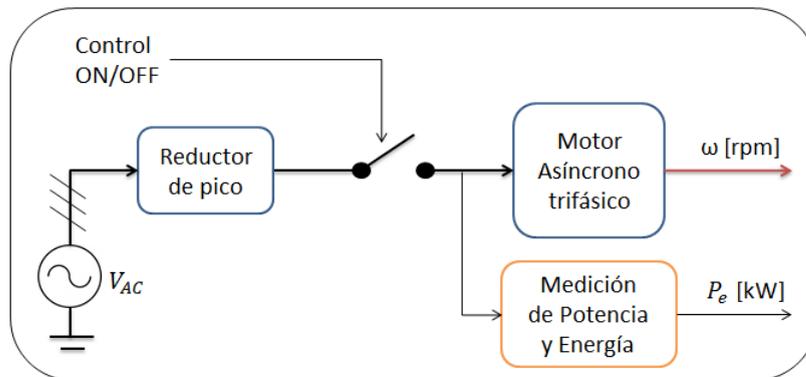


FIGURA 1.7: Diagrama de bloques del bloque Motor

Para el bloque Hidráulica mostrado en la Figura 1.8, se utiliza el *toolbox SimHydraulics*. De este *toolbox* se utiliza el modelo de la Bomba Centrífuga, el cual se basa en las ecuaciones (1.31) a (1.33) del modelo descrito anteriormente. La bomba se puede configurar con los parámetros definidos en el Cuadro 1.5, y opera siempre que la velocidad angular ( $w$ ) entregada por el motor sea diferente de cero. La bomba centrífuga adquiere el agua que esta acumulada en un Reservorio, pasando por una válvula de retención que evita que el flujo se devuelva al Reservorio. La salida del bloque Hidráulica es el caudal  $Q_b$ , esta salida es la salida del bloque Bomba Centrífuga.

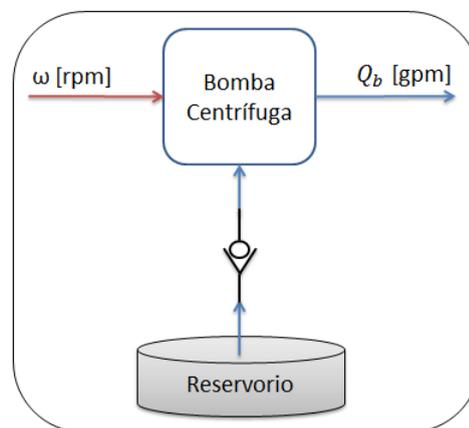


FIGURA 1.8: Diagrama de bloques del bloque Hidráulica

## 1.4. Validación del modelo

El modelo desarrollado se validó por medio de los datos experimentales tomados en el Cuarto de Bombas del Edificio Maldonado de la PUJ. Los datos fueron tomados los días jueves 26 y viernes 27 de febrero del año 2015. En la Figura 1.9, se muestra la instalación de los equipos en la toma de datos; en el cual, el recuadro amarillo A y B, muestran cómo se midió el caudal con el sensor ultrasónico, y el recuadro rojo A y B, muestran cómo se midió la potencia consumida por la bomba.

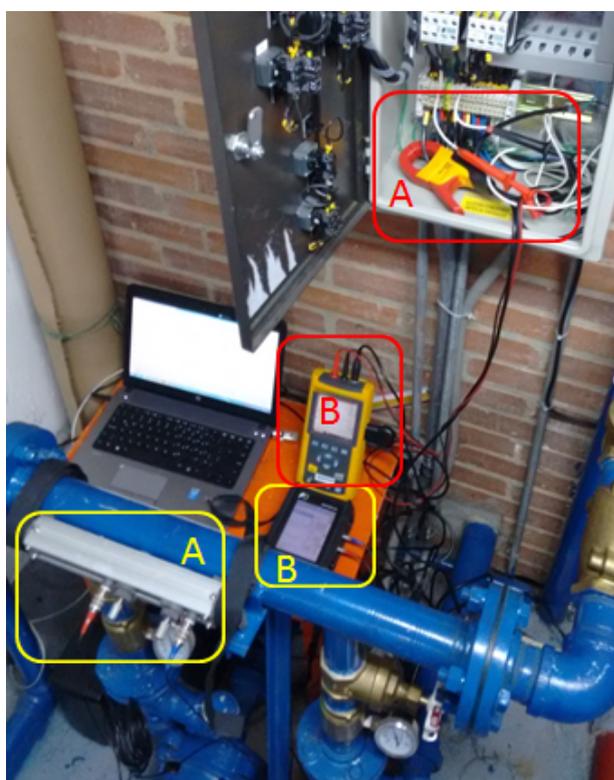


FIGURA 1.9: Medición de potencia y caudal en Cuarto de Bombas, Edificio Maldonado de la PUJ

Con las mediciones obtenidas se buscó un intervalo de tiempo en el cual existiera variaciones en la conmutación en el encendido de la bomba, que mostrara momentos de alta y baja demanda de caudal en un lapso de 1 a 2 horas; obteniendo exclusivamente las mediciones del día jueves de 3.30pm a 5.00pm. La Figura 1.10, muestra el caudal medido, en la cual se pudo observar que tiene varios picos y momentos donde no es significativo el consumo de agua; en la figura, el eje del tiempo comienza en 0 segundos

lo cual representa la medida de las 3.30pm y continua hasta 5400 segundos que representan las 5.00pm. Por lo tanto, este caudal se toma como variable de entrada al modelo simulado, para luego comparar las potencias y las energías entregadas por el modelo con las mediciones reales.

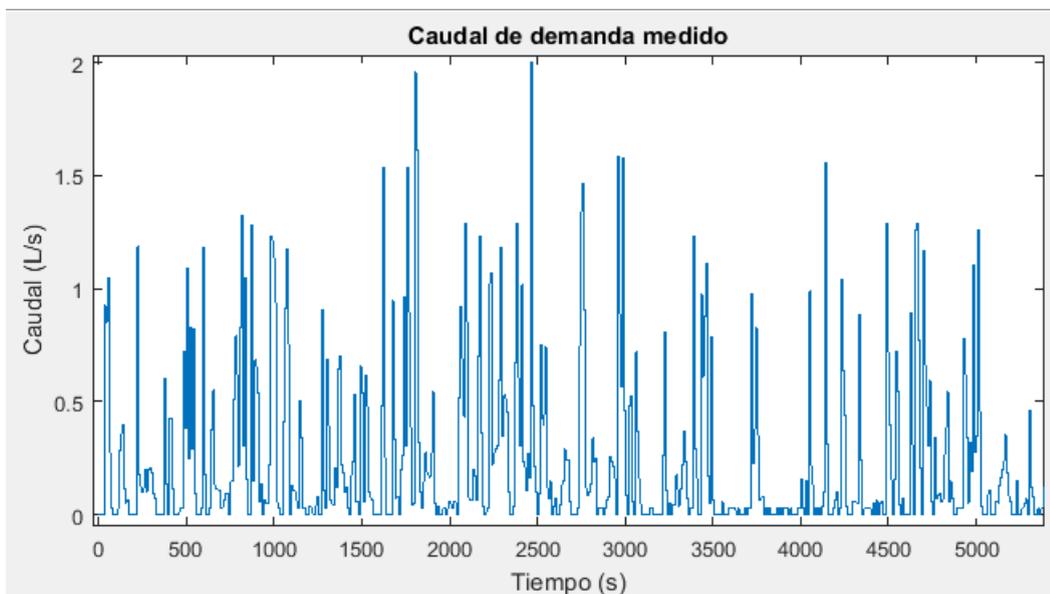


FIGURA 1.10: Caudal medido en cuarto de bombas

En el modelo se establecen las presiones límite de operación del tanque, es decir  $p_{min}$  y  $p_{max}$ , las cuales para el SEPA del Cuarto de Bombas son de 1,52 bar y 2,90 bar respectivamente (Ver Cuadro 1.1). En la Figura 1.11, se muestra la simulación de la presión de aire en el tanque, en la cual se observa que todo el tiempo se mantiene bajo el límite  $p_{max}$  establecido; mientras que para el límite  $p_{min}$ , hay momentos donde se alcanzan valores inferiores a  $p_{min}$ . Esto se debe a que en el momento de la conmutación existe un pequeño tiempo para que el agua sea suficiente, para suplir la demanda en ese momento y también para llenar el tanque presurizado.

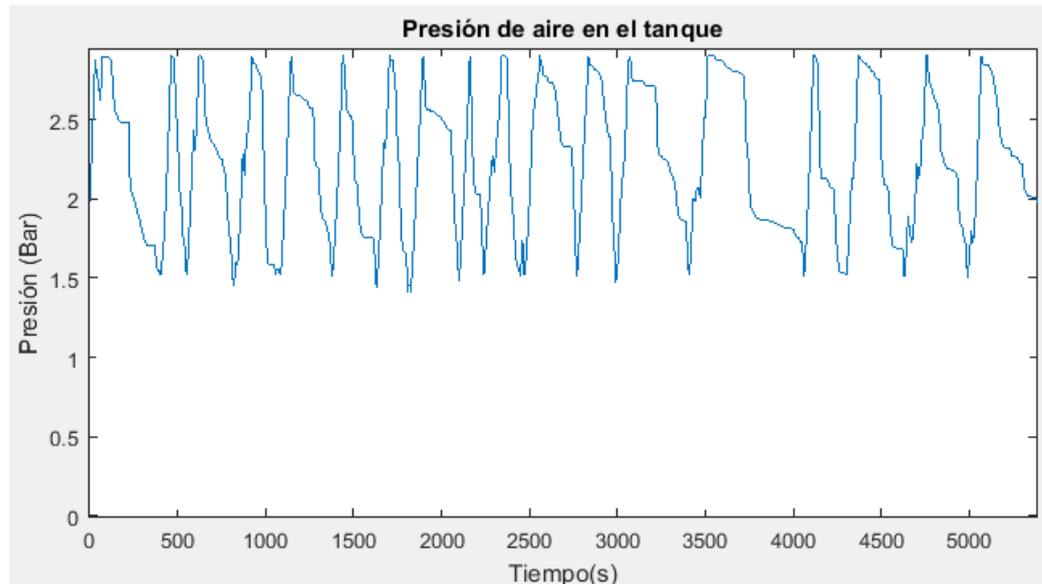


FIGURA 1.11: Simulación de la presión de aire en el tanque

Como parámetros de validación para el modelo, se compara la potencia consumida por la bomba real con la simulada por el modelo. La Figura 1.12, muestra las variaciones de potencia en el tiempo consumida por la bomba real, en color azul (datos medidos), y la potencia del modelo en color rojo. En la figura se puede observar que para los datos reales, el motor arranca 19 veces; mientras que para el modelo arranca 18 veces. Así mismo, se aprecia que hay una coincidencia en los momentos de encendido y apagado entre el modelo y los datos reales. También se puede concluir que al obtener el promedio de la magnitud de la potencia en los datos reales y en los simulados, se tiene un error aproximadamente del 10.3%. Estas diferencias se deben a que en los parámetros de simulación no se tuvo en cuenta las pérdidas en las tuberías reales, desgastes de los equipos, entre otros factores.

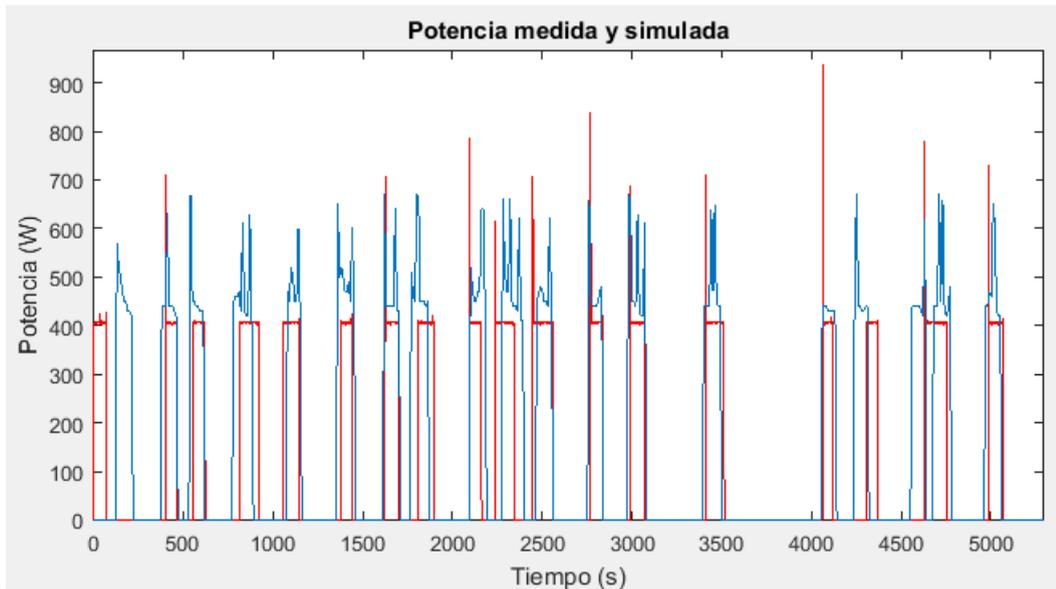


FIGURA 1.12: Potencia medida (azul) y simulada del modelo (roja)

Del capítulo se concluye que el modelo dinámico desarrollado matemáticamente e implementado en simulación, coincide con el SEPA del Edificio Maldonado de la PUJ. Con esto, se procede a evaluar la flexibilidad que pueden tener los SEPA y el servicio energético que pueden prestar a la red eléctrica, lo cual se evalúa en el siguiente capítulo.

## Capítulo 2

# Flexibilidad agregada por medio de sistemas elevadores de presión

### 2.1. Respuesta de la demanda

En [5] se define Respuesta de la Demanda (RD) como: *Los cambios en los patrones normales de consumo de electricidad en respuesta a cambios en el precio de la electricidad, o para el pago de incentivos diseñados para reducir el consumo de electricidad en momentos donde los precios del mercado son altos o cuando se pone en peligro la confiabilidad del sistema.* Los principales objetivos de la RD son:

- Reducir el consumo total en la potencia.
- Reducir la generación de energía total necesaria.
- Generar un cambio en la demanda con el fin de aprovechar las energías renovables.
- Reducir o incluso eliminar las sobrecargas en el sistema de distribución.

Éstos objetivos se reflejan en aplicaciones para consumidores residenciales, comerciales e industriales [17]. Los programas de RD se pueden dividir en dos modelos, incentivos por precio y control directo de cargas. El primero, se basa en remuneraciones económicas de acuerdo con los precios que se les envía a los consumidores. El segundo, se basa en que los usuarios disponen de un equipamiento suficientemente inteligente como para ser

controlado de forma remota por parte del distribuidor o del operador de la red [18]. En éste último, es donde se podrían ubicar a los SEPA, y así poder ofrecer una opción a la RD eléctrica.

Los beneficios de la RD también se reflejan en cómo los usuarios responden a la red; ya que teniendo el conocimiento de los precios, de cómo y cuándo consumir energía, es posible obtener un ahorro en la factura del servicio [5].

### **2.1.1. Seguridad y problema de balance**

La seguridad en un sistema eléctrico significa que el sistema debe operar indefinidamente si las condiciones externas no cambian. Aunque es un evento muy idealista dado que el sistema tiene muchos componentes y en cualquier momento uno de ellos puede fallar. El sistema debe seguir estable así existan fallas, por lo menos hasta que el operador restaure el sistema a su estado normal. Este operador debe considerar tanto la evolución del sistema como las consecuencias de las contingencias predefinidas. Las contingencias deben ser acciones correctivas pero también preventivas, que eviten la inestabilidad del sistema [19].

Los problemas en la seguridad radican en el desbalance entre la carga y la generación, por ejemplo, grandes desviaciones en la frecuencia hacen que el sistema colapse. Por el contrario, si la generación y el consumo son iguales (como opera normalmente), quiere decir, que la frecuencia y los intercambios de energía permanecen constantes. Sin embargo, el balance entre carga y generación puede ser perturbado por fluctuaciones en la carga, por imprecisiones en el control de generación, u ocasionalmente por los repentinos apagones en las unidades de generación. Es por esto, que el operador del sistema puede adaptar diferentes servicios complementarios (*Ancillary services*) dependiendo del componente que desbalancea el sistema [10].

### **2.1.2. Servicios complementarios**

El mercado de los servicios complementarios puede dividirse por la naturaleza del servicio. Los contratos a largo plazo son preferibles para servicios en los cuales la cantidad de energía necesaria no cambia o cambia muy poco en el tiempo, y para servicios en los que la disponibilidad se determina principalmente por las características de los equipos.

Los diferentes tipos de servicios complementarios se diferencian por las escalas de tiempo donde se realiza el control. Por *Horas*, donde control de cargas es por seguimiento de generación, en este caso el control de carga responde lo suficientemente rápido para seguir la tasa de cambio de la generación. De *Segundos a Minutos*, en el cual, el control de regulación se hace en intervalos de 4 segundos. La última, en *Menos de Segundos*, que se refiere a cargas que tienen el potencial para responder muy rápido, estas cargas pueden responder a cambios en la frecuencia de la red [20]. Dos servicios complementarios que se diferencian por sus tiempos de respuesta son: la regulación de frecuencia y reserva en giro.

**Regulación de frecuencia:** Maneja las fluctuaciones rápidas en la carga y pequeños cambios no detectados en la generación, este servicio mantiene la frecuencia del sistema en un valor nominal, y ante una contingencia debe responder antes de 5 segundos [19]. En la Figura 2.1, se muestra como debe responder el servicio ante una contingencia.

**Reserva en giro (*Spinning Reserve*):** En [21] definen las reservas en giro como sistemas que deben responder ante una contingencia o solicitud del operador del sistema. En este servicio, se envía la señal de reducción de demanda y la carga que presta el servicio tiene 10 minutos para superar la contingencia y mantener la frecuencia de la red en 60 Hz. La carga debe estar en capacidad de mantener la reducción en la demanda de 60 y 105 minutos, dependiendo de la solicitud. Lo anterior se describe en la Figura 2.1.

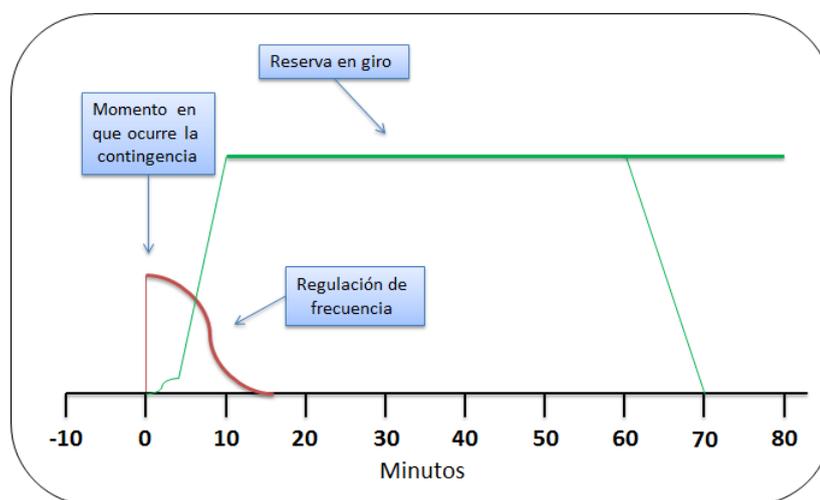


FIGURA 2.1: Respuesta de los servicios ante una contingencia coordinada o una pérdida repentina de la generación

## 2.2. Modelo dinámico del conjunto agregado

En la presente sección se plantean tres objetivos a resolver:

- Evaluar el desempeño del modelo realizado.
- Analizar como poder usar los SEPA como cargas flexibles.
- Definir el servicio complementario que pueden prestar los SEPA a la red eléctrica.

La flexibilidad busca mantener la generación y el consumo, mas no almacenar energía que puede ser consumida por otros sistemas. Para evaluar la flexibilidad, se debe tener en cuenta que debido a la naturaleza de la operación del SEPA, el proceso es aleatorio en cuanto al consumo de agua por parte de los usuarios, y a que el consumo varía en el transcurso del día. Por lo tanto, la flexibilidad se debe ver reflejada en dos preguntas relacionadas con la operación del sistema.

- ¿Qué tanta incertidumbre se puede tener (limites propios del sistema)?
- ¿Qué tan rápido se puede llegar de un límite a otro?

Para resolver estas preguntas y evaluar los tres objetivos propuestos, se realizan tres conjuntos de simulaciones. El primero, busca evaluar el desempeño del modelo, y la flexibilidad en cuanto a la potencia consumida. El segundo, busca definir el tipo de servicio complementario que puede llegar a prestar el SEPA, y así mismo, responder las preguntas de flexibilidad. Para este segundo conjunto de simulaciones se realiza una simplificación en el modelo del SEPA, con el objetivo de despreocupar los transitorios de corriente generados en el arranque del motor. Con esta simplificación se logran menores tiempos en la ejecución de las simulaciones. El tercer conjunto de simulaciones busca definir los valores límites en las presiones del tanque y cuantificar la disminución de potencia.

### 2.2.1. Desempeño del modelo

En el primer conjunto de simulaciones se mide la potencia consumida, el ciclo útil y la frecuencia de encendido y apagado del SEPA. Para esto, se simularon 25 casos para un

SEPA, en el cual, para cada caso se realizaron combinaciones con diferentes  $p_{min}$  y  $p_{max}$ . Estos 25 casos se evaluaron con caudal de demanda  $Q_{out}$  alto, medio y bajo. El Cuadro 2.1, muestra las presiones evaluadas.

CUADRO 2.1: Presiones evaluadas en el desempeño del modelo

Variable	Presión (bar)				
	Mínima	Intermedia A	Normal	Intermedia B	Máximo
$p_{min}$	1.31	1.41	1.52	1.85	2.21
$p_{max}$	2.41	2.65	2.90	3.25	3.59

En la Figura 2.2, se muestran tres niveles de consumo de potencias referentes a tres niveles de caudal  $Q_{out}$ , alto, medio y bajo, los cuales se ven de la parte superior a la parte inferior respectivamente. Estas potencias se obtienen con las posibles combinaciones de los diferentes límites de presión, concluyendo que entre menor sea el caudal de demanda, menor será la potencia consumida por el SEPA. De igual forma, es posible analizar que cuando  $p_{min}$  y  $p_{max}$  se encuentren en los valores mínimos de presión (Ver Cuadro 2.1), el consumo de potencia será menor; mientras que los mayores consumos de potencia se darán cuando  $p_{min}$  y  $p_{max}$  estén en los valores máximos de presión.

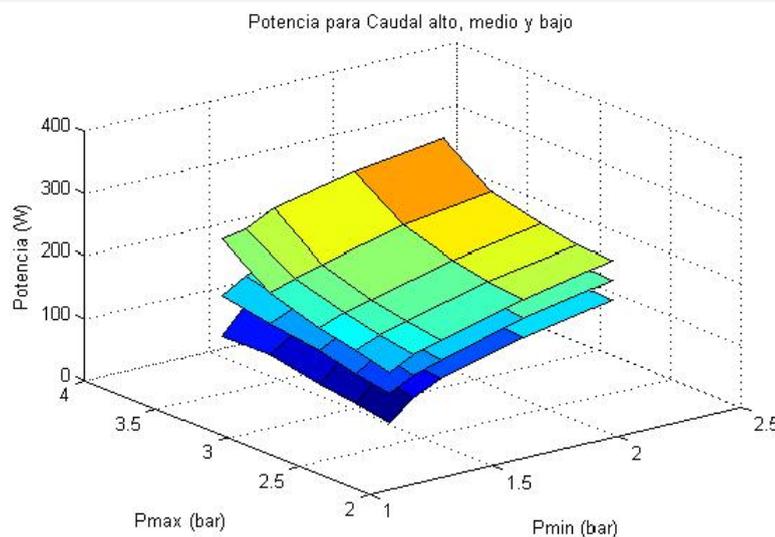


FIGURA 2.2: Potencia consumida por el SEPA al variar presión máxima y mínima, para caudal alto, medio y bajo

La Figura 2.3, muestra el ciclo útil para las mismas simulaciones. Se concluye que el comportamiento es muy similar al de la potencia, debido que el tiempo de encendido del motor será el mismo tiempo de consumo del SEPA.

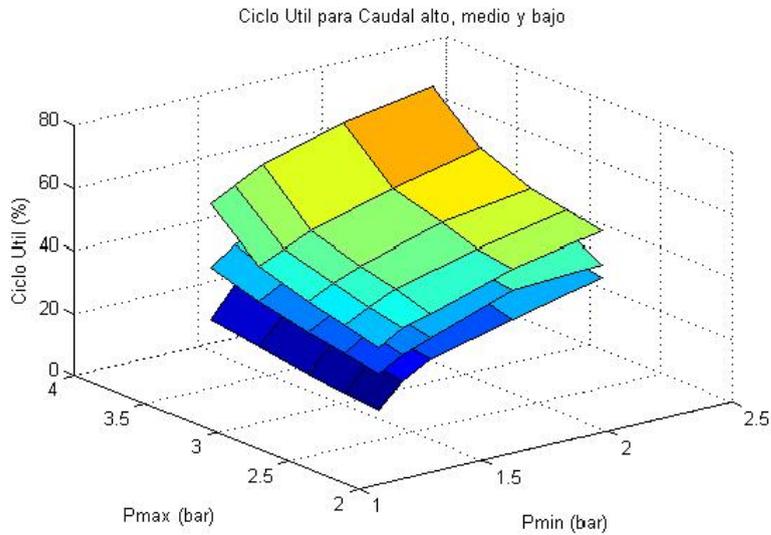


FIGURA 2.3: Ciclo util del encendido del SEPA al variar presión máxima y mínima, para caudal alto, medio y bajo

La Figura 2.4, muestra la frecuencia de encendido y apagado del motor. En este caso se observa que mientras mayor sea  $p_{min}$  y menor sea  $p_{max}$ , es decir, con diferencias de presión menores, el SEPA se va a prender y apagar con mayor frecuencia.

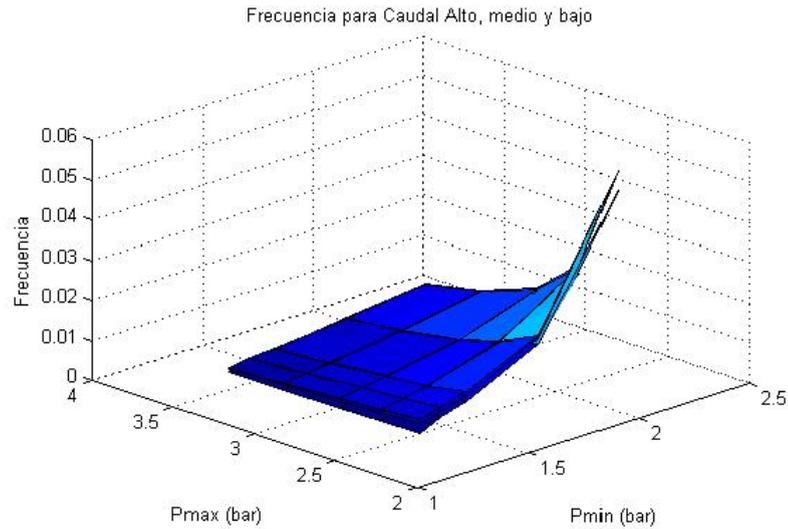


FIGURA 2.4: Frecuencia de encendido del SEPA al variar presión máxima y mínima, para caudal alto, medio y bajo

### 2.2.2. Simplificación del modelo y servicio energético

En el segundo conjunto de simulaciones, se busca conocer el tiempo de reacción del sistema frente a cambios en el punto de operación de la presión del tanque presurizado. Para estas pruebas se usa el modelo simplificado mostrado en la Figura 2.5. Este modelo difiere del otro en cuanto al bloque Bomba Centrífuga se refiere (Ver Figura 1.6), dado que ahora no se cuenta con el bloque Motor, y la entrada del bloque Bomba Centrífuga es una señal  $AQ_b$  que activa el flujo de agua e indica cuanto caudal suministrar.

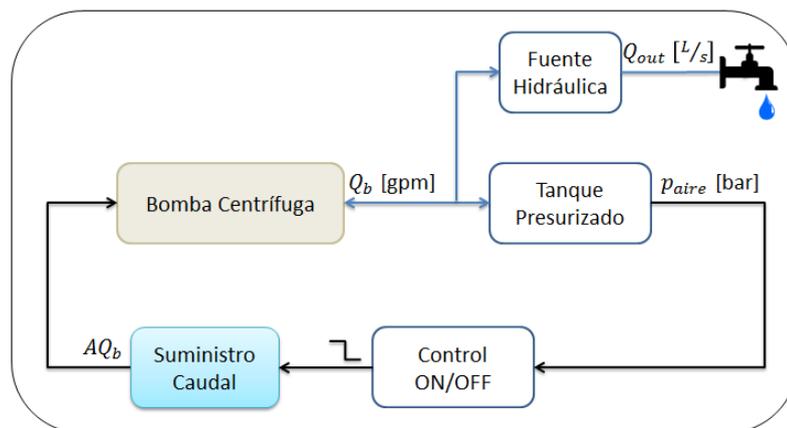


FIGURA 2.5: Diagrama de bloques del sistema SEPA, con bloque Bomba Centrífuga simplificado

El nuevo bloque de la Bomba Centrífuga se muestra en la Figura 2.6, en el cual, se tiene una Fuente Hidráulica que reemplaza los bloques Motor e Hidráulica del modelo anterior (Ver Figura 1.6). En este nuevo bloque, la Fuente Hidráulica es controlada por una señal ( $AQ_b$ ) de suministro de caudal, y succiona agua del reservorio. La fuente entrega el agua ( $Q_b$ ) al Tanque Presurizado y a otra Fuente Hidráulica (Demanda).

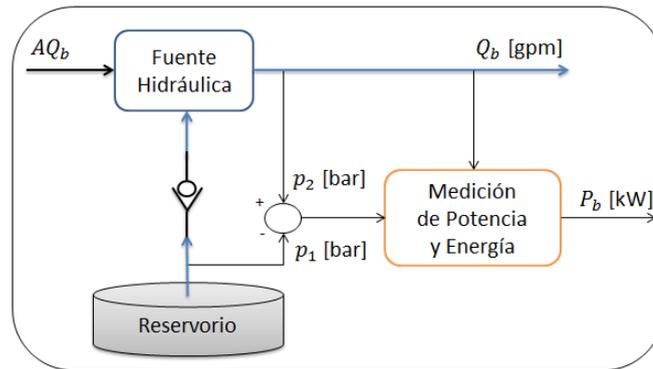


FIGURA 2.6: Diagrama de bloques del nuevo bloque Bomba Centrífuga (Modelo simplificado)

Las mediciones de potencia y energía para este caso se adquieren de diferente forma a las del modelo inicial. La magnitud de la potencia de una bomba hidráulica se puede expresar como el producto de la presión del fluido por su caudal. Por lo tanto, con las presiones  $p_1$  y  $p_2$ , y el caudal  $Q_b$ , se calcula la potencia  $P_b$  de la bomba con la ecuación (2.1). La presión  $p_1$  es la presión entregada por el acueducto, y se toma igual a 1.03 bar;  $p_2$  y  $Q_b$  representan la presión y el caudal a la salida de la bomba respectivamente. La energía es calculada integrando la potencia.

$$P_b[kW] = \frac{(p_2 - p_1)[bar] * Q_b[L/min]}{600} \quad (2.1)$$

Por lo tanto, se hace un análisis del tiempo de respuesta al modificar el punto de operación de la presión, manteniendo fija la diferencia entre  $p_{min}$  y  $p_{max}$ . Se simuló 125 SEPA, lo cual se realizó variando el volumen del tanque presurizado, el caudal entregado por la bomba y el caudal de demanda. Para cada prueba realizada los caudales fueron constantes; los valores utilizados fueron aleatorios entre los valores mostrados en el Cuadro 2.2. En todas las pruebas se mantuvo la diferencia de presión en 1bar, y se redujo el punto de operación de la presión de 2.7 bar a 1.8 bar.

CUADRO 2.2: Valores mínimos y máximos de los valores aleatorios para las variables en la simulación

Variable	Mínimo	Máximo
Volumen del tanque (L)	200	500
Caudal suministrado por la bomba (gpm)	40	90
Caudal de demanda (L/s)	0.3	0.7

Los valores del volumen del tanque y de caudal suministrado por la bomba mostrados en el Cuadro 2.2, fueron seleccionados a partir de la revisión de hojas de especificaciones y visitas a diferentes cuartos de bombas. Los valores de caudal de demanda son tomados según [22], en el cual, los valores seleccionados son para demandas medias y altas de consumos de agua.

En la simulación se evalúa el tiempo que le toma a cada SEPA volver a encender después del cambio del punto de operación. Los resultados se resumen en la Figura 2.7, en la cual, se muestra con barras, cuantos sistemas vuelven a encender por primera vez después del cambio, concluyendo que aproximadamente el 70% de los sistemas se demoran menos de 9 minutos en volver a encender.

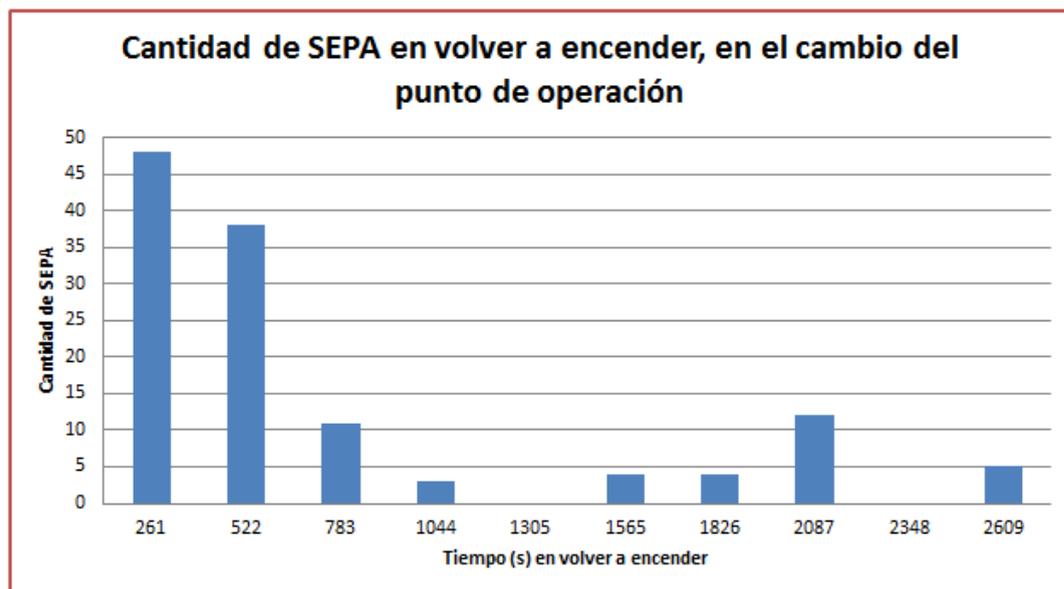


FIGURA 2.7: Tiempo que demoran los SEPA en volver a encender después de un cambio en el punto de operación

Dado el tiempo de respuesta del anterior análisis, se concluye que no es posible ubicar los SEPA en servicios complementarios rápidos, es decir, en escalas temporales de menos de minutos. Por lo tanto, no se podría prestar servicios como regulación de frecuencia.

Por lo tanto, el conjunto de varios SEPA pueden prestar el servicio energético de Reserva en giro (*Spinning Reserve*), debido al comportamiento del tiempo de respuesta en el cambio del punto de operación.

### 2.2.3. Límites de los niveles de operación

Con el tercer grupo de simulaciones de los SEPA, se definen los límites de presión en los que el SEPA opera normalmente ( $p_{min-ON}$  y  $p_{max-ON}$ ) y en los que podría operar en un cambio de punto de operación ( $p_{min-CP}$  y  $p_{max-CP}$ ) sin ocasionar daños en el sistema. También, se calcula la disminución en el consumo de potencia promedio al cambiar el punto de operación.

El menor  $p_{min}$  posible, no puede ser inferior al  $p_{min-ON}$  de operación normal en menos de 0.28 bar, debido a que es una restricción que ponen los fabricantes de los tanques presurizados. Analizando la Figura 2.2, se puede observar que para menores presiones en  $p_{max}$ , menor será el consumo de potencia; pero también se sabe que mientras menor sea  $p_{max}$ , con  $p_{min}$  fijo, se va a tener mayores conmutaciones en el motor de la bomba. Por lo tanto, se realiza una simulación con el fin de evaluar el valor de  $p_{max}$ . Para la simulación, se decide dejar:

- El límite de presión inferior en operación normal ( $p_{min-ON}$ ) igual a 2.76 bar, debido a que es el valor más utilizado en este tipo de sistemas, para edificios de alrededor de 6 pisos.
- El límite de presión inferior en el cambio del punto de operación ( $p_{min-CP}$ ) igual a 2.76 bar ( $p_{min-ON}$ ) menos 0.28 bar (sin llegar a la restricción), es decir 2.52 bar.
- El límite de presión superior en operación normal ( $p_{max-ON}$ ) igual a 4.14 bar, debido a que es el valor más utilizado en este tipo de sistemas, para edificios de alrededor de 6 pisos.
- El límite de presión superior en el cambio del punto de operación ( $p_{max-CP}$ ) se calculó de la siguiente manera, primero, se definió el número de ciclos por hora

que puede llegar a tener el SEPA. El problema con definir el número de ciclos, es que al aumentar demasiado el número de arranques en el motor, se puede llegar a sobrecalentar, lo cual deterioraría el aislamiento del estator, llegando a reducir la vida útil del motor [23].

Por lo tanto, se decide tener máximo 52 ciclos por hora en la bomba. Este valor se calcula duplicando la cantidad de ciclos realizados en el SEPA del Cuarto de Bombas del Edificio Barón; dado que en este sistema se manejan los mismos límites de presión en operación normal. Se supone este máximo de 52 ciclos debido a que el tiempo que el motor permanece encendido por ciclo será menor después del cambio del punto de operación, y a que el tiempo en el cual el motor está apagado es mayor al tiempo que esta encendido. Por lo tanto, se supone que no va a existir un sobrecalentamiento en el motor. Al definir la cantidad de ciclos se encontró que la presión superior en el cambio del punto de operación  $p_{max-CP}$  debe ser mayor a 3.07 bar.

Al definir dichos parámetros de presión, los cuales se resumen en el Cuadro 2.3, se realiza otra simulación en donde se mantienen las presiones de la operación normal ( $p_{min-ON}$  y  $p_{max-ON}$ ) en una hora, para luego cambiarlas al nuevo punto de operación ( $p_{min-CP}$  y  $p_{max-CP}$ ), igualmente manteniéndolo una hora. En esta prueba se adquirió la potencia promedio consumida en cada hora, es decir, en cada punto de operación, con lo cual se concluye que la disminución en la potencia promedio fue aproximadamente del 27 %.

CUADRO 2.3: Variables de presión definidas para el análisis de flexibilidad

Parametro	Valor en [bar]
$p_{min-ON}$	2.76
$p_{min-CP}$	2.52
$p_{max-ON}$	4.14
$p_{max-CP}$	3.017

También se concluye que para algunos momentos, con la disminución de presión en  $p_{min}$  y  $p_{max}$ , se va a generar una reducción en la presión del agua que consumen los usuarios, especialmente en los pisos más altos del edificio, lo cual genera molestia para el consumidor.

### 2.3. Sistema de control de reducción de potencia

En la presente sección se expone la manera en la cual se puede realizar RD con un conjunto de SEPA, por medio del servicio energético de reserva en giro.

Se desarrolla una estrategia de control automático la cual tiene el objetivo de reducir la potencia consumida en el conjunto de los SEPA para prestar servicios de RD, aprovechando la flexibilidad en los SEPA encontrada en el capítulo anterior. Esta reducción es útil en momentos en los cuales exista alguna contingencia en la red eléctrica. Por lo tanto, para generar esta reducción se debe enviar una señal ( $r$ ) desde el operador del sistema con el valor en  $kW$  que se desea reducir, también se necesita conocer el instante de tiempo en que se desea realizar y el instante en el cual se desea reestablecer el sistema a su operación normal, es decir, se necesita conocer el tiempo en el que la RD estará activa (plan RD).

En la Figura 2.8, se muestra el lazo de control con la planta. En este caso la planta contiene el conjunto de los SEPA, mientras que el sistema de control es el encargado de activar o desactivar la flexibilidad. Activar la flexibilidad se refiere a activar la desviación del punto de operación de la presión del aire en el tanque, como se analizó en el capítulo anterior. Por lo tanto, la acción de control  $\beta$  es quien determina el número de SEPA a activar. Debido a que no se desea cortar el suministro de agua en el edificio, no es posible parar la operación del SEPA en el plan RD, pero sí modificar su operación. Por lo tanto, la variable a controlar es la reducción de potencia en el conjunto de los SEPA, y la variable manipulada es la cantidad de sistemas a los cuales se les debe activar o desactivar la flexibilidad para mantener la reducción de potencia.

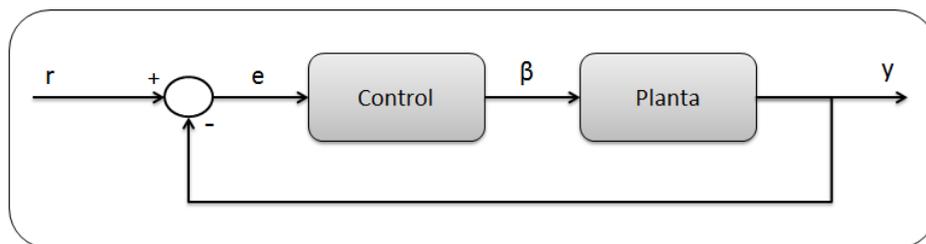


FIGURA 2.8: Diagrama de bloques del sistema de control de reducción de potencia

En la Figura 2.9, se muestra el bloque control, el cual consta de dos acciones de control. El primero, un Control PI discreto compensado con un polo, que actúa cuando se activa

el plan RD, y se encarga de activar la flexibilidad y mantener los SEPA para cumplir con la reducción de potencia; de igual forma, se diseña para que opere en los tiempos establecidos por las reservas en giro. Este control discreto tiene un tiempo de muestreo de 3 minutos, debido a que es innecesario un control más rápido dadas las características de respuesta del SEPA. La segunda acción de control (Recuperación), se encarga de desactivar la flexibilidad los SEPA en el momento que se termina el plan RD por medio de la señal  $r_f$ . Por lo tanto la salida  $\beta$  de este bloque es en cantidad de SEPA, ya sea para activar o desactivar la flexibilidad de los sistemas.

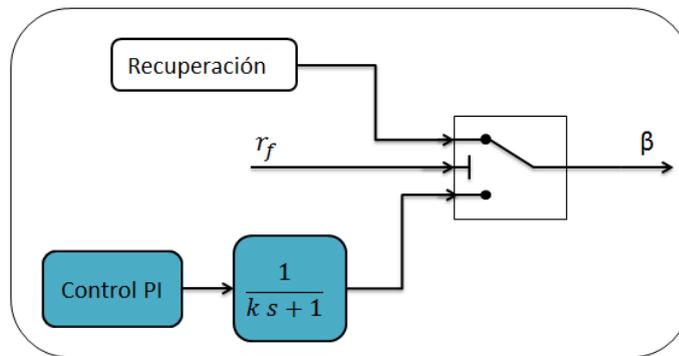


FIGURA 2.9: Diagrama de bloques del bloque Control

En la Figura 2.10, se muestra el bloque Planta en su configuración interna, en la cual, se muestra que su entrada es la cantidad  $\beta$  de SEPA a activar/desactivar flexibilidad, donde  $\beta$  es un número entre 0 y  $n$ , y  $n$  es la cantidad total de SEPA  $a_n$ . Cada SEPA  $a_i$  tiene en su entrada un valor asociado entre 1 y  $n$ , por lo tanto, si  $\beta$  es mayor al valor  $i$  asociado al SEPA, este sistema cambiará su punto de operación y entrará al plan RD. Por otro lado, cada uno de los subsistemas  $a_i$  a su salida entrega la potencia  $P a_i$  que está siendo consumida en ese momento; estas potencias se suman para obtener la potencia total  $P_T$ , la cual se utiliza para calcular la energía  $E_T$  en intervalos de 3 minutos. Posteriormente, esta energía es dividida en  $t = 3$  minutos, con el fin de tener la potencia promedio consumida  $\bar{P}_T$  en ese intervalo de tiempo. Luego, esta potencia  $\bar{P}_T$  entra al bloque Calculo de reducción de potencia, en el cual, si se activa el plan RD, la potencia de ese instante será restada con el promedio que tenía antes de activar el plan RD; mientras que si no, la potencia se resta consigo misma y la reducción será cero.

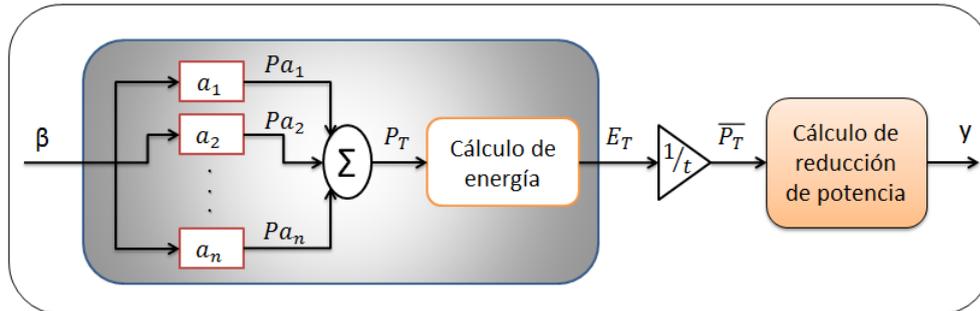


FIGURA 2.10: Diagrama de bloques del bloque Planta

Para la simulación del lazo de control, se toma un conjunto de  $n = 100$  SEPA que representan 100 edificios. En estos edificios el volumen del tanque, el caudal suministrado por la bomba y el caudal de demanda de cada edificio, son variables que difieren entre los sistemas. Dichas variables se generan aleatoriamente, y están entre los rangos mostrados en el Cuadro 2.2. Con el fin de evaluar el comportamiento del control automático se realiza una simulación, en la cual  $r$  será la solicitud de reducción por parte del operador del sistema.

Para el cálculo del controlador, se analiza cómo reacciona la planta en malla abierta ante una respuesta paso con activación de flexibilidad en los 100 sistemas en el mismo instante de tiempo. Dado que  $n = 100$ , la reducción de potencia que se obtiene en este caso, es la máxima para dicha cantidad y condiciones de SEPA. La simulación realizada activa el plan RD a los 3600 segundos (1 hora), lo mantiene otros 3600 segundos, y lo desactiva en 7200 segundos (2 horas).

La respuesta de la reducción de potencia se puede ver de color rojo en la Figura 2.11. Con esta figura, se observa que el comportamiento de la reducción de potencia se puede calcular matemáticamente como un modelo de primer orden compensado con un cero, como se muestra en la ecuación (2.2).

$$G(s) = \frac{As + k_p}{\tau s + 1} \tag{2.2}$$

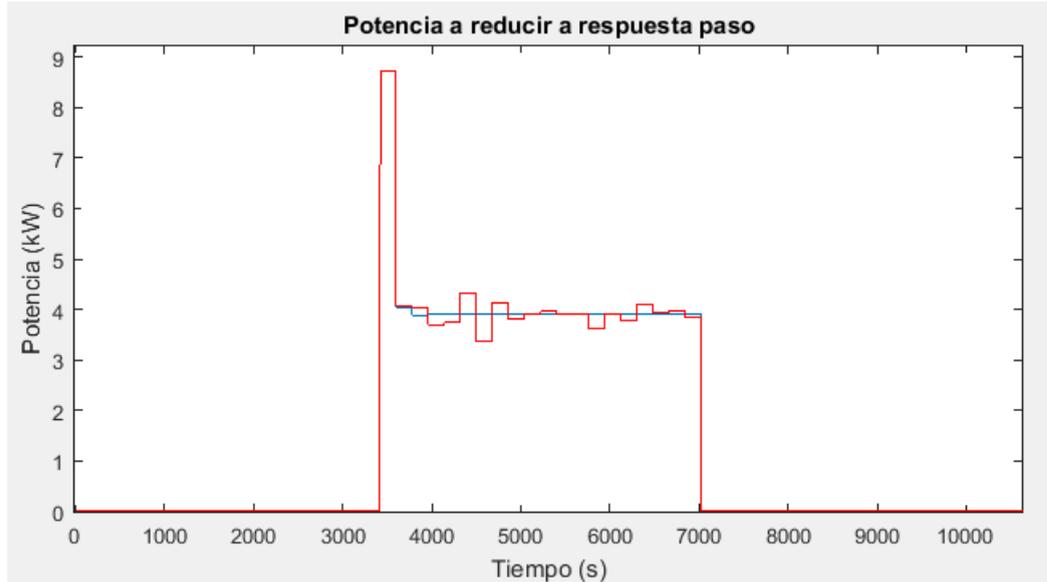


FIGURA 2.11: Respuesta paso de la planta del modelo calculado (Azul) y planta con los 100 SEPA (Roja)

Para el cálculo de  $k_p$ , se requiere conocer la entrada paso (100) y el valor en el cual se estabiliza la respuesta. Debido a que la respuesta varía alrededor de un valor, se calcula el promedio en el cual varía, obteniendo como resultado 3.9 kW. Por lo tanto se obtiene:

$$k_p = \frac{\Delta Y}{\Delta U} = \frac{3,9}{100} = 0,039 \quad (2.3)$$

Debido a que es un sistema discreto el  $\tau$  no se puede calcular de la forma clásica (tiempo en el 63%), por lo tanto, se halla analizando la salida y ajustando el valor.  $A$  se halla con el mismo método. Con lo cual, se obtiene el modelo de la ecuación (2.4). En la Figura 2.11, se muestra la respuesta del modelo calculado en color azul, en la cual, se observa que el modelo se estabiliza en 3.9 kW, mientras que la planta con los 100 sistemas varía alrededor del mismo valor. También se observa que el sobrepico en los dos casos es similar.

$$G(s) = \frac{10,21s + 0,039}{45s + 1} \quad (2.4)$$

Con el modelo calculado, es posible encontrar un controlador que compense el efecto del sobrepico en la planta, y establezca el sistema antes de 10 minutos, lo cual se debe garantizar en el servicio energético reserva en giro. Por lo cual, se decide ubicar un polo

en -0.00368, lugar en el cual se encuentra el cero de la planta, con el fin de compensar el sobrepico de la misma, y poder calcular el controlador del siguiente modelo:

$$G(s) = \frac{0,039}{45s + 1} \quad (2.5)$$

Debido a que el modelo a controlar es un modelo de primer orden, se plantea un control proporcional integral (PI). El controlador PI, es una técnica de control que reduce el error  $e$  del sistema a cero en estado estacionario, lo cual es suficiente para la planta a controlar. Además, los controladores PI son de los más utilizados en la industria, lo cual facilitaría su implementación a futuro.

El controlador se calcula por el lugar de las raíces, en el cual se realiza una localización de polos en lazo cerrado, teniendo como parámetro un tiempo de establecimiento menor a 480 segundos (8 minutos), con el fin de garantizar que antes de los 10 minutos se encuentre en el valor de la reducción solicitada. Con estos parámetros las constantes de controlador son:  $P = 1,948$  e  $I = 0,224$ .

Con el controlador PI calculado en tiempo continuo, se calcula el controlador discreto que actuará en el lazo de control cada tres minutos. Por lo tanto, transforma a forma discreta por medio de la transformada bilineal, la cual se describe de la siguiente forma:

$$H_d(z) = H_a(s) \quad (2.6)$$

donde,

$$s = \frac{2z - 1}{Tz + 1} \quad (2.7)$$

reemplazando,

$$H_d(z) = H_a\left(\frac{2z - 1}{Tz + 1}\right) \quad (2.8)$$

Como el control en tiempo continuo es:

$$C(s) = 1,948 + \frac{0,224}{s} \quad (2.9)$$

Entonces el control discreto es el mostrado en la ecuación (2.10), en la cual  $T$  es el tiempo de muestreo.

$$C(z) = 1,948 + 0,224 * \frac{2 z - 1}{T z + 1} \quad (2.10)$$

## 2.4. Validación del sistema de control

Con el fin de validar el controlador y poder involucrar los SEPA en los servicios de reserva en giro, se realiza la simulación del lazo cerrado. Para este caso, se envía una señal de reducir potencia en 3.9kW, en el segundo 3240 (2 muestras antes de la reducción), con el fin de que el controlador comience a actuar a los 3420 segundos (1 muestra antes) y tener la reducción desde los 3600 segundos, tiempo en el cual se desea iniciar con el plan RD. La señal de reducción de potencia se desea mantener 1 hora desde que inicia, por lo cual, el operador del sistema envía la orden de fin del plan RD a los 7020 segundos (1 muestra antes de que se desactive). En el momento de desactivar la flexibilidad, el control PI deja de actuar, y el sistema empieza a desactivar la flexibilidad a razón de 20 SEPA cada muestreo, con el fin de evitar un sobrepico a causa de que todos se desactiven al mismo tiempo.

La Figura 2.12, muestra la cantidad de sistemas a los que se les activa la flexibilidad en el plan RD, y los que se desactivan después del plan. En la figura, se observa que la curva sube controlada por el control PI, y se muestra que comienza su acción una muestra antes de cuándo debe empezar la reducción.

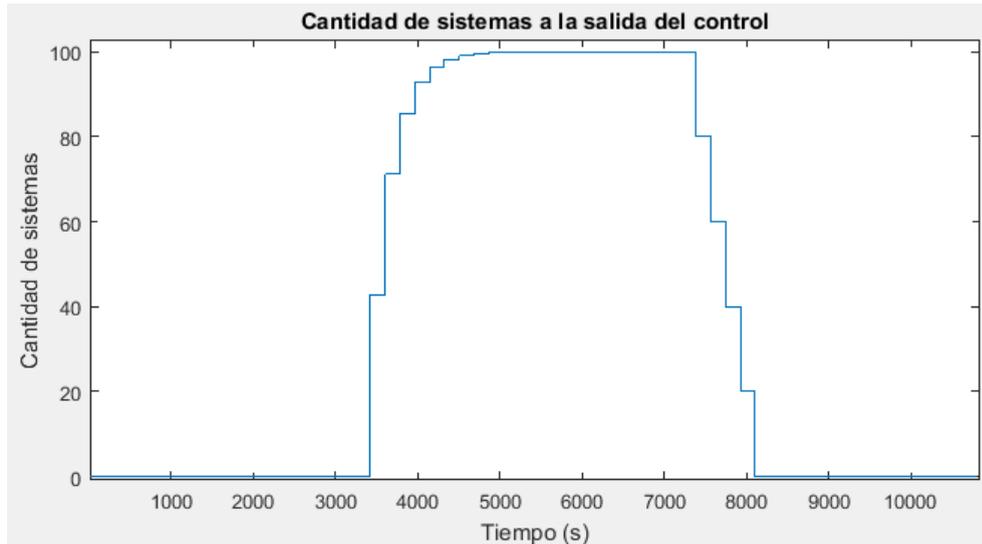


FIGURA 2.12: Cantidad de sistemas en la activación de flexibilidad para respuesta de la demanda

En la Figura 2.13, se muestra la respuesta de la reducción de potencia, en la cual, se observa que su tiempo de reducción es de 1 hora, comenzando en 3600 segundos y terminando en 7200 segundos. Además, se muestra que tiene varias fluctuaciones, pero se mantiene estable alrededor del valor deseado 3.9 kW. Las fluctuaciones son inevitables debido a que el consumo de demanda de agua es aleatorio y a que los sistemas SEPA no reaccionan rápidamente. Por lo tanto, como parámetro de validación del controlador, se tiene que el tiempo de respuesta es de 3 muestras (9 minutos) desde 3600 segundos, pero se aclara que existe un preaviso por parte del operador del sistema de mínimo 6 minutos.

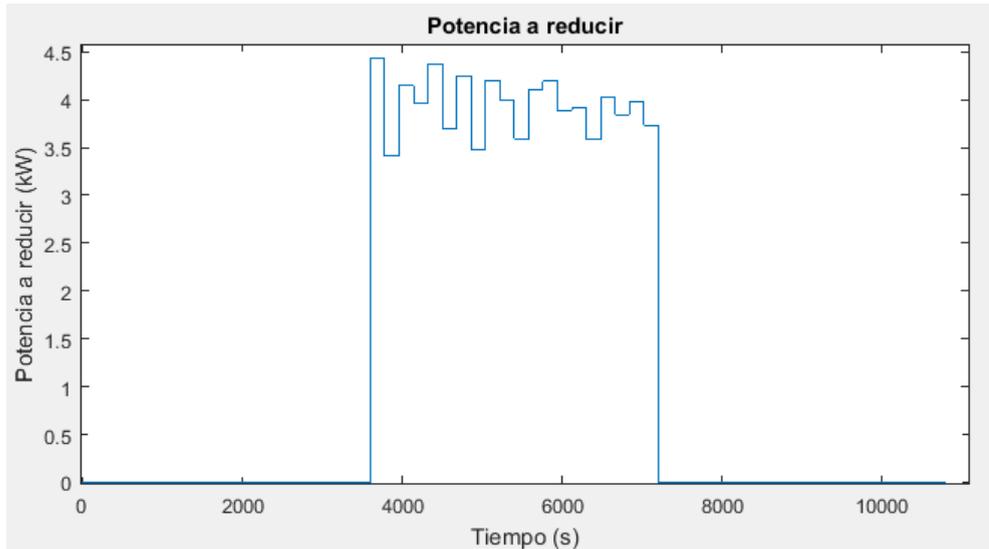


FIGURA 2.13: Reducción de potencia en el plan RD

En la Figura 2.14, se muestra el consumo de potencia en toda la prueba, en la cual se observa que la reducción de potencia cumple con el servicio de reserva en giro, reduciendo el consumo de potencia. El otro parámetro de validación del controlador, es el promedio de potencia consumida en la reducción. Por lo cual, de esta figura se obtiene que el promedio de la primera hora fue de 15.47 kW, mientras que el de la segunda hora fue de 11.54 kW, por lo tanto, el promedio de la potencia consumida por la planta fue de 3.93kW. Lo anterior genera un error del 0.77% en la reducción de potencia.

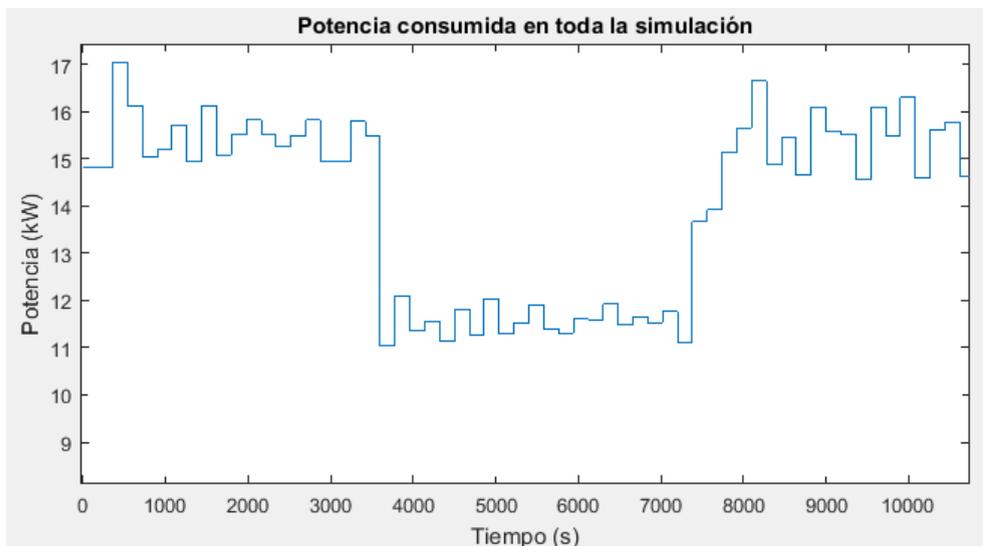


FIGURA 2.14: Potencia consumida las tres horas de la prueba

Del capítulo se concluye que al realizar variaciones en las presiones  $p_{min}$  y  $p_{max}$  de operación del tanque presurizado, se puede obtener una disminución en el consumo de potencia, con el cual se definió la flexibilidad del SEPA. Por otra parte, se encontró que debido al tiempo de respuesta de los SEPA ante cambios en el punto de operación, los SEPA pueden prestar el servicio energético de reserva en giro. Por lo tanto, se diseñó un sistema de control con el cual responder a contingencias en la red eléctrica, por medio de la activación de flexibilidad de los SEPA en el plan RD.

Por último, se hace una aproximación al uso del control diseñado y en especial a la flexibilidad de los SEPA de la zona Ciudad Salitre de Bogotá. Para esto, se utilizan los datos de [24], en el cual, exponen que Ciudad Salitre cuenta con alrededor de 14000 apartamentos, distribuidos en 80 conjuntos residenciales. Por lo tanto, si se supone que en promedio los edificios cuentan con 10 pisos y que cada piso tiene 4 apartamentos, se podría decir que en Ciudad Salitre hay aproximadamente 350 edificios residenciales. Con estos datos, y sabiendo que con 100 edificios se puede llegar a disminuir el consumo de potencia en 3.9 kW, Ciudad Salitre podría reducir la potencia en 13.7 kW por medio de los SEPA, ante una contingencia en la red eléctrica.

Con el anterior ejemplo, se puede concluir que este tipo de sistemas tienen un consumo muy bajo, y por ende, la disminución en potencia es igualmente baja para aportar energía a la red, debido a que una planta que presta este tipo de servicios energéticos opera en el orden de megavatios. Por lo tanto, a pesar de que se modela la dinámica de los SEPA y se logra controlar su operación, la cantidad de energía que se puede reducir no es suficiente para llevarlo a cabo en la práctica.

## Capítulo 3

# Conclusiones y trabajo futuro

Se construyó un modelo dinámico del Sistema de Elevación de presión de Agua (SEPA) a partir de datos experimentales de variables como, consumo de potencia, caudal entregado por la bomba centrífuga y rango de presión del aire en el cual opera el tanque presurizado. Con este modelo se determinó que el sistema puede funcionar como carga flexible variando los rangos de presión de operación del tanque, y se diseñó una arquitectura de control que permite prestar servicios de reserva en giro (*Spinning Reserve*) usando un conjunto de varios sistemas.

El modelo se realizó a partir de principios físicos y se validó con las mediciones realizadas en el Edificio Maldonado de la PUJ, lo cual se refleja teniendo una relación de 1.4 en el consumo de energía entre los dos casos, y un error del 10.3% en la magnitud de la potencia.

A partir del análisis de flexibilidad en cuanto al consumo de potencia de los SEPA, se concluye que al reducir los límites de operación de la presión del tanque del SEPA, en promedio se puede llegar a reducir la potencia consumida hasta en un 27%, de la consumida en la operación normal. Con esta disminución de potencia se podría generar una disminución de la presión en las tuberías, lo cual generaría incomodidad para algunos usuarios, especialmente para los que se encuentren en los pisos más altos.

Con el análisis del tiempo de respuesta en el que los SEPA tardan para llegar de un punto de operación a otro. Se encuentra con que el conjunto de varios SEPA puede prestar el servicio eléctrico de reserva en giro (*Spinning Reserve*), debido a que son capaces de

cumplir con la reducción de potencia en menos de 10 minutos y mantenerlo por una hora.

Se propone una estrategia de control automático para la activación y desactivación de flexibilidad de varios SEPA ante una contingencia en la red eléctrica. La estrategia se basa en un control PI compensado con un polo, que operan en el momento de la solicitud de reducción de potencia y deja de operar en el momento que se termina el servicio prestado. El control tiene un error del 0.77% en el promedio de la reducción de potencia, y un tiempo de respuesta de 9 minutos, contando con que no se tiene en cuenta el tiempo del preaviso por parte del operador del sistema.

Por medio del control automático diseñado y la flexibilidad del SEPA, se puede concluir que en una zona como Ciudad Salitre se podría llegar a reducir 13.65 kW, si así lo solicita el operador del sistema. Con este análisis, se podría concluir que en promedio cada SEPA puede llegar a reducir 39 W, gracias a los cambios de presión en la operación del tanque del SEPA.

Como trabajo futuro, se podría realizar una mejora en la precisión del modelo del SEPA, teniendo en cuenta las pérdidas en las tuberías del sistema, el desgaste de los equipos, y los transitorios de corriente en los arranques del motor; con el fin de obtener una mejor aproximación del modelo, lo cual se podría observar al comparar la energía consumida por el SEPA, la cual para el presente modelo fue de 1.4.

Otro posible trabajo futuro, sería realizar una evaluación de la implementación real del control en los SEPA y analizar los costos de llevarla a cabo. En este punto se tendría que pensar en una red de comunicación inalámbrica entre los SEPA y el operador del sistema eléctrico.

Por ultimo, hay que seguir investigando qué sistemas pueden operar como cargas flexibles, que tengan mayores consumo de potencia para poder integrarlas a la red eléctrica.

# Bibliografía

- [1] J. W. J. de Wekker V. Sistemas de bombeo, características y dimensionamiento. Universidad Católica Andrés Bello, Junio 2004.
- [2] Villegas. Curso de bombas hidráulicas, Abril 2012.
- [3] Gabriel Ignacio Tejada Alfonso. Control predictivo híbrido para gestión de demanda eléctrica. Master's thesis, Pontificia Universidad Católica de Chile, Septiembre 2010.
- [4] Alec Brooks, Ed Lu, Dan Reicher, Charles Spirakis, and Bill Weihl. IEEE power & energy magazine. Demand dispatch, May/June 2010.
- [5] Edison Cardona Rendón. Método para optimizar los costos del servicio de energía eléctrica de grandes usuarios en Colombia, incorporando flexibilidad de la demanda. Master's thesis, Escuela de Administración Universidad EAFIT, 2013.
- [6] Fredy Ruiz. Colombia energy sector survey, August 2013.
- [7] XM filial de ISA. Descripción mercado eléctrico de Colombia XM gestión de sistemas en tiempo real, 2013.
- [8] MinMinas. Tips energéticos, ley 1715 de 2014, Mayo 2014.
- [9] Jason S. MacDonald Duncan S. Callaway Emre Can Kara, Michaelangelo D. Tabone and Sila Kiliccote. Quantifying flexibility of residential thermostatically controlled loads for demand response: A data-driven approach controlled loads. pages 140 – 147, Nov 2014.
- [10] Kameshwar Poolla He Hao, Borhan M. Sanandaji and Tyrone L. Vincent. Aggregate flexibility of thermostatically controlled loads. *IEEE Transactions on power systems*, 30(1):189 – 198, Jan 2015.

- 
- [11] P.E. & Joseph Sanchez Mark Brickey, Paul Larson. How potable water rises to the top of skyscrapers, metropolitan industries. October - December 2005.
- [12] Erick Amaury Argueta Méndez. Implementación de sistemas hidroneumáticos residenciales, ventajas y desventajas. Master's thesis, Universidad de San Carlos de Guatemala, Febrero 2011.
- [13] Rodrigo Cristián Inostroza Espejo. Análisis técnico económico de sistemas de elevación de aguas para edificios residenciales. Master's thesis, Universidad de Chile, Marzo 2011.
- [14] Jose Castaneda y Duvan Castellanos. Diseño y construcción de un acumulador tipo pistón para el laboratorio de potencia fluida. Master's thesis, Universidad Industrial de Santander, 2011.
- [15] Rodrigo López Cárdenas. *Método Híbrido para el diagnóstico de fallas en motores de inducción Trifásicos*. PhD thesis, Instituto Politécnico Nacional, Julio 2008.
- [16] MSc. Jhon Barbosa Juan J. García, MSc. Ricardo Bermudez. Modeling and simulation of a centrifugal pump with single phase motor in simulink. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(22), 2013.
- [17] Nizar Zorba John S. Vardakas and Christos V. Verikoukis. A survey on demand response programs in smart grids: Pricing methods and optimization algorithms. *IEEE Communications surveys and tutorials*, 2013.
- [18] Fernando Soto Martos. *Gestión activa de la demanda de energía eléctrica*. Marzo 2010.
- [19] Daniel Kirschen and Goran Strbac. *Fundamentals of Power System Economics*. John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
- [20] XM filial de ISA. Dirección programación operación despacho económico, 2013.
- [21] Oak Ridge National Laboratory. *Spinning Reserve From Responsive Loads*. CERTS Real Time Grid Monitoring and Management, March 2003.
- [22] Diana Cristina Bastidas delgado. Caracterización y estimación de consumos de aguas de usuarios residenciales. caso de estudio: Bogotá. Master's thesis, Universidad de los Andes, Enero 2009.

- [23] B. Venkataraman, Godsey B, W. Premerlani, E. Shulman, Thaku M, and R. Midence. Fundamentals of a motor thermal model and its applications in motor protection. In *Protective Relay Engineers, 2005 58th Annual Conference for*, pages 127–144, April 2005. doi: 10.1109/CPRE.2005.1430428.
  
- [24] Observatorio social. Alcaldía local de Fontibón. Ciudad salitre resena básica barrial, 2013.