

## 5. PLAN DE PRUEBAS

El plan de pruebas de la instalación experimental recoge la metodología de trabajo de la instalación así como la estrategia y alcance de los ensayos previstos en función de las principales variables objeto de análisis en la instalación.

### 5.1. Modos de operación

La versatilidad y flexibilidad de la planta de generación de gases permite un amplio rango de trabajo en los modos de operación posibles. En este manual se restringe a cuatro modos operativos como base para elaborar el manual de operación. Posteriormente, el plan de pruebas recoge toda la matriz de pruebas de ensayo donde se describen de forma detallada las condiciones operativas en función de las principales variables de proceso objeto de análisis experimental. Se procede a describir la operación y la secuencia de actuaciones para pasar de un modo a otro. Los modos operativos son indicados en la tabla 5.1:

Tabla 5.1. Modos de operación base manual de operación

Modos de operación	Caudal gasoil (kg/h)	Comburente (Nm <sup>3</sup> /h)			Potencia caldera (kW)	Descripción
		Aire	O <sub>2</sub>	Flue Gas		
<b>Aire</b>	20.0	289	-	-	263	Funcionamiento en modo aire (único comburente) y trabajo a la mínima potencia
<b>OXI 30</b>	30.5	250	32	-	401	Comburente aire + O <sub>2</sub> hasta máximo enriquecimiento. Condiciones de potencia relativamente bajas
<b>OXI 40</b>	44.1	220	70	116	580	Operación en OXI con 3 corrientes de gases (comburente) Requerimientos de potencia medios
<b>OXI 80</b>	125.0	98	289	773	1644	Operación límite en potencia (max 1450 kW) y trabajo con 3 comburentes distintos

## 5.2. Manual de operación

Se describe en el siguiente apartado las actuaciones necesarias para el arranque de la instalación de oxicomcombustión. Con ello se pretende asegurar un correcto funcionamiento de los equipos que componen la misma, así como garantizar el cumplimiento de las estrictas condiciones de seguridad exigidas para cada modo de operación.

La secuencia de órdenes aquí descrita es independiente del modo de operación deseado. Las etapas son secuenciales y deben seguirse inequívocamente sea cual sea las condiciones operativas que se desee.

### ➡ ARRANQUE CALDERA AGUA CALIENTE

El arranque de la caldera se realiza en las condiciones de mínima potencia y empleando únicamente aire como comburente.

#### *Ensayos previos del quemador antes del arranque*

Este procedimiento puede realizarse en este momento del arranque o como primera etapa, ya que no depende de ninguna de las acciones llevadas a cabo hasta el momento. Al ser el elemento clave de la instalación, deben satisfacerse todas las condiciones impuestas en los ensayos previos, lo que garantiza la seguridad del quemador en todos los modos operativos dispuestos.

Los ensayos tienen como objetivo asegurar el correcto funcionamiento de las medidas de seguridad dispuestas en caso de fallo de algunos de los elementos que lo componen o del suministro tanto de gasoil como de aire comprimido.

Los sistemas de seguridad de los que consta el equipo están recogidos en el manual del mismo.

En primer lugar, es necesario chequear todas las señales, conexiones eléctricas, cuadros de maniobra y fuerza, lazos de control, funcionamiento de la valvulería y sistemas de control.

Los ensayos y pruebas a efectuar son los siguientes:

*Por fallo en el comburente*

1. Desconectar soplante S-1
2. Observar disminución de presión en PI-101
3. Cuando la presión disminuya por debajo de 10 mbarg (presión de tarado del presostato), se activa la alarma: 'Fallo presión comburente a quemador'
4. Automáticamente, se corta la alimentación a las electroválvulas EV-103, EV-104, EV-401, EV-402, EV-301 y EVR-301 y se bloquea todo el sistema por falta de llama

*Por fallo en el combustible (baja)*

1. Cerrar válvula MV-126
2. Se observa descenso de presión en PI-104 y PI-105
3. Cuando la presión disminuya por debajo de la presión de 0,5 barg (presión de tarado del presostato), se activará la alarma de fallo de presión de combustible
4. Automáticamente, se corta la alimentación a las electroválvulas EV-103, EV-104, EV-401, EV-402, EV-301 y EVR-301 y se bloquea todo el sistema por falta de llama

*Por fallo en el combustible (alta)*

1. Disminuir la presión de alta (2 barg)
2. Se observa descenso de presión en PI-104 y PI-105

3. Cuando la presión sea superior a la nueva presión de de alta (presión de tarado del presostato de alta), se activará la alarma de fallo de presión de combustible
4. Automáticamente, se corta la alimentación a las electroválvulas EV-103, EV-104, EV-401, EV-402, EV-301 y EVR-301 y se bloquea todo el sistema por falta de llama

#### *Por falta de llama*

1. Se extraen las células de detección de llama Célula UV-101 y Célula UV-102 de sus posiciones en el quemador
2. Se activará la alarma de falta de llama
3. Automáticamente, se corta la alimentación a las electroválvulas EV-103, EV-104, EV-401, EV-402, EV-301 y EVR-301 y se bloquea todo el sistema por falta de llama

#### *Por falta de alimentación*

1. Se provoca el fallo en la alimentación mediante el interruptor general
2. Automáticamente, se corta la alimentación a las electroválvulas EV-103, EV-104, EV-401, EV-402, EV-301 y EVR-301 y se bloquea todo el sistema por falta de llama

#### *Estanqueidad y resistencia a la presión interna*

1. Se trabaja con la instalación de gasoil a una presión 1,5 veces la presión de trabajo
2. Se comprueba el adecuado funcionamiento, ausencia de fugas y la capacidad de regulación de presión

Se describen las actuaciones necesarias para realizar un correcto y seguro arranque de la caldera:

### *Llenado caldera de agua caliente*

Se procede inicialmente al llenado de la caldera en el lado de tubos. Se debe verificar el llenado completo y la purga del aire que pueda quedar en la instalación:

1. Comprobar que las válvulas MV-136 (a arqueta) y MV-137 (a purga) están cerradas
2. Abrir MV-138 y MV-139 (agua de red)
3. Abrir MV-112 y MV-113 (circuito primario de refrigeración), cerrando MV-114 (venteo caldera)
4. Se procede al llenado de los tubos de agua de caldera y de la línea del circuito primario de refrigeración. Es necesario purgar el aire residual que quede en la instalación
5. Para purgar el aire residual en el circuito primario, se abren las válvulas MV-115 y MV-116 (purga circuito primario) hasta comprobar la salida continua de agua. En ese instante, se cierran ambas válvulas, además de MV-138 y MV-139.
6. Será necesario purgar agua del circuito en intervalos de tiempo definidos por el fabricante. Para ello se abre la válvula MV-138 durante el periodo de tiempo estipulado. El depósito D-101 amortiguará el agua purgada. En el caso de que no sea suficiente, se deberá aportar agua de red del mismo modo en el que se ha operado para el llenado (volver al punto 1)
7. Se pone en marcha la bomba B-0 a la mínima velocidad posible, verificando el correcto funcionamiento del equipo y de la instrumentación asociada a la caldera (TT-105, TT-106, TT-109, PIT-106)

### Arranque torre de refrigeración

En segundo lugar, debe ponerse en marcha la torre de refrigeración, auxiliares y las bombas de agua para el circuito secundario de caldera y los intercambiadores necesarios para controlar la temperatura de gases de caldera.

Los pasos que deben seguirse se describen a continuación:

1. Abrir las válvulas de alimentación de agua de red a la torre (MV-233 y MV-201)
2. Comprobar el llenado del fondo de torre y el correcto funcionamiento del controlador de nivel mecánico, observando que la boya cierra completamente el paso de agua cuando en el nivel máximo de la piscina. Verificar que no hay derrames por abertura de alguna válvula o por el desagüe.
3. Comprobar que MV-202, MV-219, MV-220 y MV-204 están completamente abiertas y MV-221 y MV-222 están completamente cerradas. Son las válvulas del circuito de refrigeración del intercambiador I-1
4. Poner en marcha la bomba BR-1 (circuito secundario de refrigeración de caldera). Es conveniente trabajar a la menor velocidad posible y comprobar el correcto funcionamiento del control de nivel de la torre. Si existe algún problema de llenado, obstrucción de alimentación de agua de red o vaciado de la piscina, desconectar la bomba.
5. Verificar las medidas de los termopares TT-103, TT-104 y TT-201
6. Comprobar que MV-205, MV-207, MV-223 y MV-224 están completamente abiertas. Son las válvulas del circuito de refrigeración del intercambiador I-2
7. Poner en marcha la bomba BR-2 (enfriador de gases de combustión a 150°C). Es conveniente trabajar a la menor velocidad posible y comprobar el correcto funcionamiento del control de nivel de la torre. Si existe algún

problema de llenado, obstrucción de alimentación de agua de red o vaciado de la piscina, desconectar la bomba.

8. Poner en marcha las bombas dosificadoras BP-1 y BP-2. Es necesario comprobar que ambos depósitos tienen cantidad suficiente de reactivos y que no existe ninguna obstrucción o derrame en la línea de aporte a la torre. Es necesario programar los temporizadores según dictamine el fabricante en la puesta en marcha y verificar el correcto funcionamiento de ambas bombas.
9. Abrir la válvula MV-217. Verificar el funcionamiento del control de conductividad, observando que el transmisor de conductividad CT-201 da señal y que la electroválvula EV-201 abre cada cierto tiempo para realizar la purga de control.
10. Poner en marcha el ventilador de tiro inducido de la torre de refrigeración.

### *Aporte auxiliares caldera*

Una vez asegurado el correcto funcionamiento de la refrigeración de la caldera, se procede a suministrar cada uno de los auxiliares requeridos para el arranque: gas a piloto, gasoil y aire comprimido

#### *Gasoil*

Si la línea está cebada, no es necesario seguir estos pasos para realizar el arranque

1. Verificar los niveles de gasoil en los depósitos de almacenamiento D-102 y D-103.
2. Si D-103 dispone de gasoil, utilizar éste como alimentación a caldera. Cerrar MV-132 y abrir MV-133 (válvulas de salida de depósito de gasoil). Si no, trabajar con el depósito D-102

3. Verificar cebado de la línea de aspiración del grupo de presión, comprobando
4. Cerrar MV-135

#### *Aire Comprimido*

1. Abrir MV-301
2. Verificar presión de suministro
3. Regular presión a 8 barg mediante manorreductor PC-301

#### *Piloto de Gas*

1. Verificar el suministro de gas
2. Válvula de la seta abierta (en botella de gas)

#### *Colocación válvulas línea de gases para el arranque*

1. Abrir MV-101, MV-102, MV-104, MV-106, MV-109 y MV-119 (válvulas circuito de gases)
2. Cerrar MV-103, MV-105, MV-107, MV-108, MV-110, MV-117 y MV-118 (válvulas circuito de gases)
3. Abrir válvulas automáticas FV-101, FV-104 y cerrar FV-102 (válvulas automáticas circuito de gases)

#### *Arranque caldera*

##### *Comprobaciones iniciales*

1. Verificar la estanqueidad de tuberías, accesorios y aparatos de combustible
2. Despejar el recinto de obstáculos y personal no autorizado
3. Posicionar las señales de permiso del quemador en el cuadro en la posición 'desconectado'

4. Verificar las conexiones eléctricas
5. Verificar que la válvula MV-126 está cerrada (aporte de combustible)
6. Verificar los reglajes indicados
7. Verificar el sentido de giro de las soplantes S-1, S-2, S-3 y S-4

#### *Ajuste previo presiones de acometidas*

1. Abrir MV-126, MV-127 y MV-128
2. Verificar que la presión de combustible en la acometida es de 4 barg, indicada en PI-104
3. Mediante el regulador de presión PC-101, se observa que la presión indicada por PI-105 es de 2 barg (Presión de trabajo)
4. Abrir MV-301 y MV-302 (aporte aire comprimido)
5. Ajustar la presión de acometida de aire comprimido a 2 barg mediante la actuación sobre PC-301
6. Ajustar la presión de acometida de aire comprimido al inyector de combustible y a las células UV a 100-125 mbarg mediante la actuación sobre PC-302

#### *Ajuste piloto de ignición*

1. Desconectar la alimentación de las electroválvulas de combustible EV-103 y EV-104 del cuadro de caldera (electroválvulas de combustible)
2. Comprobar que la presión de acometida del aire comprimido para el piloto de gas este comprendido entre 100 y 125 mbarg. Si no es así, ajustar mediante actuación sobre PC-302 (punto 6 de ajuste previo de presiones de acometidas)
3. Abrir MV-401 y mantener cerrada MV-402 (aporte gas piloto)
4. Verificar que la presión de acometida de gas esté entorno a 100 mbarg, indicado en PI-401
5. Abrir MV-304 y cerrar MV-305 (aire comprimido a inyección de gas piloto)

6. Abrir simultáneamente MV-402 y MV-305 (aporte de gas y aire comprimido respectivamente), verificando la existencia de llama y posicionando ambas válvulas de aguja en una posición donde se observe una llama ligeramente con exceso de gas (entre anaranjada y azulada)
7. En lo sucesivo, si ocurre algún desajuste en el piloto de gas debido a la variación de la presión de acometida de aire comprimido o de gas, se debe actuar sobre las válvulas MV-402 y MV-305 para mantener las condiciones de combustión citadas anteriormente
8. Cerrar MV-401 y MV-304 para apagar el piloto de gas

#### *Arranque automático*

1. Conectar seccionador general del cuadro eléctrico de control de caldera
2. Conectar automáticos del cuadro eléctrico de control de caldera
3. Verificar la posición de los pulsadores de emergencia del cuadro de control de caldera, fuera de su posición de bloqueo
4. Verificar que las válvulas del circuito de gasoil MV-134, MV-126, MV-127, MV-128, MV-130, MV-131 están abiertas y MV-129 y MV-135 están cerradas
5. Encender la bomba B-G del grupo de presión
6. Comprobar que las presiones del combustible son las adecuadas. En caso contrario, ir al apartado de ajustes iniciales
7. Encender soplante S-4
8. Verificar la presión de la línea de comburente mediante abertura de MV-102 y comprobación en PI-101
9. Regular las condiciones de presión aportadas por la soplante S-4 mediante manipulación de MV-101
10. Comprobar las medidas de caudal de comburente aportadas por FT-101 y FT-104. Deben ser iguales

11. Fijar set point para caudal en FC-101. Este caudal ha sido estimado en los balances de materia. Se tomara un valor con un incremento del 10% por seguridad.
12. Activar FV-101. Se colocará en la posición correcta automáticamente, para mantener el caudal en el valor de set point introducido. En el caso del arranque, corresponde con un valor de caudal de  $289 \text{ Nm}^3/\text{h}$
13. Verificar presión mediante PI-101
14. En el caso de que la presión sea excesiva (por encima de 160 mbarg), se dispara la electroválvula EV-101, no siendo posible realizar el arranque. Para disminuir la presión a valores aceptables, es necesario actuar sobre MV-101 provocando una disminución en la presión de la línea. FV-101 actuará de modo que mantenga el caudal indicado en el set point. Es posible actuar sobre la velocidad de giro de la soplante S-4, aumentándola o disminuyéndola en función de nuestras necesidades.
15. En el caso de que estas actuaciones no permitan alcanzar los niveles necesarios de presión, se arranca la soplante S-1, actuando sobre las válvulas MV-101 y FV-104 para obtener las condiciones de presión y caudal requeridas. Si es necesario, se pasa a trabajar exclusivamente con S-1, parando S-4.
16. Abrir la válvula de aporte de gas MV-401
17. Si todo es correcto, se activa en el cuadro la señal 'seguridades generales'
18. Tras la activación, comienza el tiempo de purga, impulsando aire ambiente mediante la soplante S-4 (o S-1) y purgando las posibles acumulaciones de gases en la instalación. Este periodo de purga dura 120 s
19. Habilitar la solicitud de permiso de encendido en el cuadro de caldera
20. El sistema debe activar el permiso

21. Activar la señal de 'encendido'. Se activa el piloto de ignición
22. Una vez verificada la llama del piloto de gas, se activan automáticamente las electroválvulas de combustible y aire de inyección
23. Se verifica la existencia de llama mediante las células UV-101 y UV-102, activando en el cuadro la señal quemador encendido (caso de que la combustión sea correcta y estable).
24. Si el encendido o el funcionamiento no es correcto, se desactivan automáticamente las electroválvulas de combustible EV-103 y EV-104, cortando el suministro de combustible. El quemador queda bloqueado hasta nuevo rearme
25. Una vez encendido, se debe actuar sobre el regulador R-1, definiendo un caudal de combustible de 22 kg/h (potencia mínima). Este regulador manda la señal a la válvula de regulación de combustible FV-105, colocándose en la posición pertinente. Verificar el caudal de combustible mediante el caudalímetro FT-105. El controlador del ratio de comburente debe estar desactivado.
26. Arrancar soplante S-2 a la mínima velocidad de giro posible
27. Regular el tiro en el hogar mediante manipulación de MV-104 y MV-105, evitando un excesivo alargue de la llama y tiro en el hogar que pueda provocar el apagado de la misma
28. Abrir MV-221 y MV-222 y cerrar MV-220 (refrigeración I-1). Verificar el correcto funcionamiento de la válvula de control TV-101. En el caso de que las temperaturas en el agua de caldera sean demasiado elevadas, desactivar TV-101, cerrando MV-221 y MV-222 y abriendo MV-220
29. Cerrar MV-224 (refrigeración I-2). En el caso de que las temperaturas de los gases de salida de caldera sean excesivas, proceder de modo contrario, abriendo paulatinamente MV-224 hasta mantener dichas temperaturas en valores admisibles

30. Asegurar el funcionamiento en régimen permanente, esperando que las condiciones operativas no cambien en 20 minutos (mínimo). Es necesario verificar que las temperaturas en los circuitos de refrigeración, caldera, hogar y salida de gases se mantienen en valores aceptables.

### *Operación modo OXI 30*

El paso de modo combustión convencional a OXI 30 es el más sencillo de todos, dado que solo es necesario incluir el aporte de O<sub>2</sub> para aumentar la concentración en el comburente hasta un 30%. Los pasos a seguir se indican a continuación:

1. Abrir MV-123 y MV-125 en la línea 106 de aporte de O<sub>2</sub>
2. Fijar el caudal de O<sub>2</sub> mediante regulación con MV-124, observando en FT-100 que el caudal de O<sub>2</sub> es de 32 Nm<sup>3</sup>/h
3. Observar el efecto que produce este incremento de O<sub>2</sub> en las condiciones de funcionamiento de la caldera: Llama, temperatura lado de humos (TT-110 y TT-111), temperatura circuito primario de refrigeración (TT-109 y TIT-105). Si existe alguna anomalía en alguna de las señales y no se ha producido señal de alarma, cerrar MV-125.
4. Fijar en el controlador de caudal de combustible, regulador R-1, un caudal de combustible de 30,5 kg/h. Este regulador manda señal a la válvula de regulación de combustible FV-105, colocándose en la posición pertinente. Verificar el caudal de combustible mediante el caudalímetro FT-105. El controlador del ratio de comburente debe estar desactivado.
5. Es necesario verificar el correcto funcionamiento de la caldera (variables indicadas en el punto 3):
  - a. En el caso de observar deficiencias en la llama: fluctuaciones, punto de ignición retardado de la boca del quemador, etc, regular el aporte de aire comprimido mediante la manipulación de MV-303.

- b. En el caso de obtener incrementos de temperatura excesivos en el agua de refrigeración de la caldera, aumentar la velocidad de giro de la bomba B-0 o manipular el by-pass de BR-1, cerrándolo (MV-204). La primera acción es más directa, con una respuesta más rápida del sistema.
  - c. En el caso de observar temperaturas excesivas en los gases de combustión, actuar sobre las válvulas TV-102 y MV-224 para aumentar el caudal de agua de refrigeración de I-2. También puede manipularse el by-pass de BR-2 actuando sobre MV-207 o sobre la velocidad de giro de BR-2.
  - d. Por último, es necesario comprobar que todos los auxiliares (aire comprimido, combustible, comburente) trabajan en las condiciones requeridas por el fabricante y asegura el correcto funcionamiento de los equipos de impulsión, sistemas de seguridad y válvulas automáticas
6. Fijar el caudal de aire a  $250 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , FC-101. Actuará sobre la posición de la válvula FV-101. Si se observan presiones en el comburente por encima de 50 mbarg en la entrada de caldera, regular la posición de las válvulas MV-101 y FV-104 hasta obtener una presión adecuada sin modificar el caudal aportado. En caso de no ser posible, actuar sobre la velocidad de giro de la soplante S-4 (o S-1) para conseguir las condiciones de presión y caudal exigidas
7. Verificar el correcto funcionamiento del equipo (punto 5)
8. Verificar que el  $\text{O}_2$  a la salida de caldera se encuentra entorno al 5%. Es imprescindible controlar que el valor no se encuentre por debajo del 3% para asegurar una combustión adecuada y evitar la formación de hollín. Si ocurre este hecho, aumentar la consigna en FC-101 (caudal de aire). Regular posteriormente el aporte de  $\text{O}_2$  para conseguir las condiciones

de OXI30 manipulando MV-124 hasta observar que AT-101 marque 30% en O<sub>2</sub>.

En el caso de que el valor de O<sub>2</sub> indicado en AT-102 sea muy superior al 5%, aumentar la consigna progresivamente de FC-105 hasta controlar el valor de O<sub>2</sub> a la salida de caldera.

9. Verificar el correcto funcionamiento del equipo (punto 5)

#### *Operación modo OXI 40*

El paso de modo OXI 30 a OXI 40 es crítico, ya que se combinan tres corrientes distintas para conformar el comburente.

1. Abrir progresivamente MV-103
2. Observar como afecta a la llama y al tiro inducido por S-2 en el hogar.
3. Poner en modo manual FV-102
4. Colocar FV-102 un 20% abierta (se determina a partir de los balances de materia, la concentración de O<sub>2</sub> cuando se mezcle aire + gas recirculado. Se coloca la posición de FV-102 en donde se obtenga dicha concentración, medida por AT-101)
5. Arrancar S-3 a la mínima velocidad de giro
6. Observar como afecta a la llama y al tiro de S-2 en el hogar. En caso de tiro excesivo, cerrar MV-103 hasta estabilizar el sistema. Es posible también reconducir los gases y bypasar I-2, abriendo MV-106 y cerrando MV-105 para disminuir la pérdida de carga del sistema de gas a proceso (o chimenea)
7. Fijar en el controlador de caudal de combustible, regulador R-1, un caudal de combustible de 44,1 kg/h. Este regulador manda señal a la válvula de regulación de combustible FV-105, colocándose en la posición pertinente. Verificar el caudal de combustible mediante el caudalímetro FT-105. El controlador del ratio de comburente debe estar desactivado.

8. Observar la llama generada. Aumentar el aporte de aire comprimido si es necesario mediante manipulación de MV-303
9. Abrir MV-124 hasta conseguir 70 Nm<sup>3</sup>/h de O<sub>2</sub>
10. Activar el control automático de FV-102, para ajustar la concentración de O<sub>2</sub> en el comburente hasta el 30% en O<sub>2</sub>
11. Actuar sobre el punto de consigna del controlador FC-101, indicando un caudal de 220 Nm<sup>3</sup>/h.
12. Es necesario realizar un reajuste de las presiones y caudales en cada una de las líneas:
  - a. Línea 106 (O<sub>2</sub>): si es necesario incrementar la presión de descarga, actuar sobre PR-102, aumentando la consigna. Normalmente será suficiente con las condiciones nominales de funcionamiento
  - b. Línea 103 (Flue Gas Recirculation): Se debe actuar sobre el variador de frecuencia de la soplante S-3 y la válvula MV-103, comprobando que el tiro generado en la caldera no es excesivo. La válvula FV-102 regula el caudal aportado por la soplante para asegurar la concentración de O<sub>2</sub> en el comburente a la entrada
  - c. Línea 101 (aire): Se debe actuar sobre el variador de frecuencia de la soplante S-4 y la válvula MV-101. En el caso de no disponer de presión suficiente, será necesario arrancar S-1, teniendo que volver a reajustar las presiones de trabajo en cada una de las líneas (punto 12)
  - d. Línea 109 (gases de combustión): El reajuste de presiones puede afectar a las condiciones operativas en el hogar. Debe de controlarse la depresión en el interior del mismo, dado que un valor excesivo puede alargar demasiado la llama y provocar el apagado. Para controlarlo, se debe actuar sobre el variador de la soplante S-2, encargada del tiro y sobre las válvulas MV-103, MV-

105 y MV-106, cerrándolas en el caso de que ocurra una depresión excesiva

13. Es necesario verificar el correcto funcionamiento de la caldera (variables indicadas en el punto 3):
  - a. En el caso de observar deficiencias en la llama: fluctuaciones, punto de ignición retardado de la boca del quemador, etc, regular el aporte de aire comprimido mediante la manipulación de MV-303.
  - b. En el caso de obtener incrementos de temperatura excesivos en el agua de refrigeración de la caldera, aumentar la velocidad de giro de la bomba B-0 o manipular el by-pass de BR-1, cerrándolo (MV-204). La primera acción es más directa, con una respuesta más rápida del sistema.
  - c. En el caso de observar temperaturas excesivas en los gases de combustión, actuar sobre las válvulas TV-102 y MV-224 para aumentar el caudal de agua de refrigeración de I-2. También puede manipularse el by-pass de BR-2 actuando sobre MV-207 o sobre la velocidad de giro de BR-2.
  - d. Por último, es necesario comprobar que todos los auxiliares (aire comprimido, combustible, comburente) trabajan en las condiciones requeridas por el fabricante y asegura el correcto funcionamiento de los equipos de impulsión, sistemas de seguridad y válvulas automáticas

#### *Operación modo OXI*

En el caso de trabajar en condiciones OXI superiores, en primer lugar se debe cerrar el balance de materia de cada una de las corrientes que intervienen en el proceso. Una vez definidos los caudales de cada línea, se actúa siguiendo el protocolo definido anteriormente:

1. Poner en modo manual FV-102
14. Abrir FV-102 hasta posición deseada (se determina a partir de los balances de materia, la concentración de O<sub>2</sub> cuando se mezcle aire + gas recirculado. Se coloca la posición de FV-102 en donde se obtenga dicha concentración, medida por AT-101)
2. Observar como afecta a la llama y al tiro de S-2 en el hogar. En caso de tiro excesivo, cerrar MV-103 hasta estabilizar el sistema. Es posible también reconducir los gases y bypasar I-2, abriendo MV-106 y cerrando MV-105 para disminuir la pérdida de carga del sistema de gas a proceso
3. Fijar en el controlador de caudal de combustible, regulador R-1, hasta el caudal deseado. Este regulador manda señal a la válvula de regulación de combustible FV-105, colocándose en la posición pertinente. Verificar el caudal de combustible mediante el caudalímetro FT-105. El controlador del ratio de comburente debe estar desactivado.
4. Observar la llama generada. Aumentar el aporte de aire comprimido si es necesario mediante manipulación de MV-303
5. Abrir MV-124 hasta conseguir el caudal de O<sub>2</sub> necesario según el balance de materia
6. Activar el control automático de FV-102, para ajustar la concentración de O<sub>2</sub> en el comburente hasta el 30% en O<sub>2</sub>
7. Actuar sobre el punto de consigna del controlador FC-101, indicando un caudal de aire necesario según el balance de materia.
8. Es necesario realizar un reajuste de las presiones y caudales en cada una de las líneas:
  - a. Línea 106 (O<sub>2</sub>): si es necesario incrementar la presión de descarga, actuar sobre PR-102, aumentando la consigna. Normalmente será suficiente con las condiciones nominales de funcionamiento

- b. Línea 103 (Flue Gas Recirculation): Se debe actuar sobre el variador de frecuencia de la soplante S-3 y la válvula MV-103, comprobando que el tiro generado en la caldera no es excesivo. La válvula FV-102 regula el caudal aportado por la soplante para asegurar la concentración de O<sub>2</sub> en el comburente a la entrada
  - c. Línea 101 (aire): Se debe actuar sobre el variador de frecuencia de la soplante S-4 y la válvula MV-101. En el caso de no disponer de presión suficiente, será necesario arrancar S-1, teniendo que volver a reajustar las presiones de trabajo en cada una de las líneas (punto 12)
  - d. Línea 109 (gases de combustión): El reajuste de presiones puede afectar a las condiciones operativas en el hogar. Debe de controlarse la depresión en el interior del mismo, dado que un valor excesivo puede alargar demasiado la llama y provocar el apagado. Para controlarlo, se debe actuar sobre el variador de la soplante S-2, encargada del tiro y sobre las válvulas MV-103, MV-105 y MV-106, cerrándolas en el caso de que ocurra una depresión excesiva
9. Es necesario verificar el correcto funcionamiento de la caldera (variables indicadas en el punto 3):
- e. En el caso de observar deficiencias en la llama: fluctuaciones, punto de ignición retardado de la boca del quemador, etc, regular el aporte de aire comprimido mediante la manipulación de MV-303.
  - f. En el caso de obtener incrementos de temperatura excesivos en el agua de refrigeración de la caldera, aumentar la velocidad de giro de la bomba B-0 o manipular el by-pass de BR-1, cerrándolo

(MV-204). La primera acción es más directa, con una respuesta más rápida del sistema.

- g. En el caso de observar temperaturas excesivas en los gases de combustión, actuar sobre las válvulas TV-102 y MV-224 para aumentar el caudal de agua de refrigeración de I-2. También puede manipularse el by-pass de BR-2 actuando sobre MV-207 o sobre la velocidad de giro de BR-2.
- h. Por último, es necesario comprobar que todos los auxiliares (aire comprimido, combustible, comburente) trabajan en las condiciones requeridas por el fabricante y asegura el correcto funcionamiento de los equipos de impulsión, sistemas de seguridad y válvulas automáticas

#### ➡ PARADA CALDERA AGUA CALIENTE

Para realizar la parada de la caldera, deben seguirse los siguientes pasos:

1. Fijar en el controlador de caudal de combustible, regulador R-1, hasta el caudal mínimo de 22 kg/h. Este regulador manda señal a la válvula de regulación de combustible FV-105, colocándose en la posición pertinente. Verificar el caudal de combustible mediante el caudalímetro FT-105. El controlador del ratio de comburente debe estar desactivado.
2. Desactivar la señal en el cuadro 'Solicitud de permiso de encendido'
3. Cerrar MV-121 de entrada de O<sub>2</sub>
4. Cerrar MV-126 de entrada de combustible y apagar grupo de presión (B-G)
5. Cerrar MV-401 de entrada de gas
6. Cerrar MV-301 de entrada de aire comprimido

7. Dejar funcionando el sistema de impulsión de gases y los circuitos de refrigeración hasta observar que las temperaturas disminuyen a valores aceptables
8. Apagar S-3
9. Cerrar MV-103 de gases de recirculación
10. Apagar S-2
11. Apagar S-1 y/o S-4
12. Apagar B-0
13. Apagar las bombas de refrigeración BR-1 y BR-2
14. Apagar las bombas de dosificación BP-1 y BP-2
15. Apagar ventilador de la torre de refrigeración
16. Cerrar MV-233, MV-201, MV-217 en la torre de refrigeración

### 5.3. Condiciones de operación principales variables de proceso

En este apartado se ha desarrollado la matriz de ensayo de la instalación experimental, donde se describen todos los casos objeto de análisis en función de los parámetros experimentales del proceso. Se incluyen las variables objeto de análisis, las variables medibles y un apartado final donde se describe la evaluación de los resultados del trabajo realizado.

Se toma como caso base la producción de  $300 \text{ Nm}^3/\text{h}$  de gases de combustión tomando aire como comburente y temperatura de gases  $50^\circ\text{C}$

La secuencia de operación para cada jornada de operación parten de un protocolo de actuaciones que consisten en:

- a) Verificación de conexionado eléctrico de la instalación y suministro de *utilities*
- b) Verificación de señales
- c) Verificación de funcionamiento de equipos

- d) Verificación de seguridades de la instalación
- e) Aplicación protocolo de arranque
- f) Funcionamiento durante 30 min en modo aire a bajo caudal de combustible (aprox. 40 kg/h de gasoil)
- g) Transición al modo de oxicomcombustión deseado
- h) Ajuste de parámetro de ensayo mediante manipulación de SCADA y operaciones de carácter manual
- i) Producción de gas de proceso (de ensayo a otras instalaciones experimentales)
- j) Protocolo de parada
- k) Seguridad parada de suministro de *utilities*

Las variables que pueden ser medidas en la instalación, como entradas digitales o analógicas, gracias a la instrumentación descrita en el apartado pertinente se recoge en las Tablas 5.2 y 5.3:

Tabla 5.2. Listado de señales de entrada analógicas

Elemento	Señal	Tipo Señal	Rango	Unidades	Descripción
FT-100	4-20 mA	A	0-340	Nm <sup>3</sup> /h	Medida de caudal de oxígeno inyectado (procede del cuadro del sistema de suministro de oxígeno)
FT-101	4-20 mA	P (2 hilos)	0-100	m <sup>3</sup> /h	Medida de caudal de aire atmosférico
FT-102	4-20 mA	P (2 hilos)	0-200	m <sup>3</sup> /h	Medida de caudal del Gas de combustión recirculado
FT-301	4-20 mA	P (2 hilos)	0-1	m <sup>3</sup> /h	Medida de agua de retorno del hervidor H-1
TT-101	4-20 mA	A	0-300	°C	Medida de temperatura del aire atmosférico + recirculación a la entrada de S-1
TT-102	4-20 mA	P (2 hilos)	0-400	°C	Medida de temperatura del gas de combustión que sale de CA-1 y va a I-2 (procede del cuadro de caldera)
TT-103	4-20 mA	A (2 hilos)	0-100	°C	Medida de temperatura del agua de refrigeración de T-1 a la entrada de I-1
TT-104	4-20 mA	P (2 hilos)	0-100	°C	Medida de temperatura del agua de retorno a T-1 a la salida de I-1
TIT-105	4-20 mA	P (2 hilos)	0-100	°C	Medida de temperatura del agua a la salida de la caldera (procede del cuadro de caldera)

TT-109	4-20 mA	A (2 hilos)	0-100	° C	Medida de temperatura del agua a la entrada de la caldera (procede del cuadro de caldera)
TT-107	4-20 mA	A (2 hilos)	0-200	° C	Medida de temperatura del gas de combustión aguas abajo de I-2
TT-302	4-20 mA	P (2 hilos)	0-200	° C	Medida de temperatura del agua que sale de H-2 y va a la caldera auxiliar CA-2
PIT-106	4-20 mA	A	0-5	bar (g)	Medida de presión en la caldera (procede del cuadro de caldera)
AT-101	4-20 mA	A	0-50 %	%	Medida de porcentaje de oxígeno a la entrada del quemador
AT-102	4-20 mA	P (2 hilos)	0-25 %	%	Medida de porcentaje de oxígeno a la salida de caldera (Analizador existente)
FT-104	4-20 mA	P (2 hilos)	0-1800	Nm <sup>3</sup> /h	Medida de caudal de comburente a la entrada del quemador
FIT-105	4-20 mA	A (2 hilos)	0-200	litros/h	Medida de caudal de gasoil alimentado al quemador (alimentado del cuadro de CA-1)
TT-110	4-20 mA	A	0-2200	° C	Medida de temperatura en el hogar de la caldera de agua caliente
TT-111	4-20 mA	A	0-2200	° C	Medida de temperatura en el hogar de la caldera de agua caliente

Tabla 5.3. Listado de señales de entrada digitales

Elemento	Señal	OFF	ON	Descripción
O2-PT_LL	24 Vcc	BAJA	OK	Baja presión O <sub>2</sub>
CA-1_S	24 Vcc	PARADA	MARCHA	Confirmación de marcha de la caldera de agua caliente C-1
CA-1_RREQ	24 Vcc	--	REARMAR	Necesidad de rearme de la caldera de agua caliente
FT-301,T	24 Vcc	--	FALLO	Totalizador caudalímetro medida de agua de retorno del hervidor H-1
LV-A0104	24 V cc	--	NIVEL	Nivel alcanzado reposición de agua de caldera

### Parámetros experimentales

Dentro de las variables que pueden ser analizadas, medidas o manipuladas en la instalación, se describen a continuación las seleccionadas para servir como análisis de sensibilidad en el proceso de estudio de la oxicomcombustión:

**a) Grado de enriquecimiento del aire**

Esta variable es la que presenta un mayor interés práctico, ya que permite analizar las condiciones de proceso en cualquier punto de una instalación de producción de energía mediante combustibles fósiles para todo el rango de operación en modo oxi. La principal influencia de este parámetro se produce sobre la composición de los gases de combustión a tratar. Serán analizados un total de 7 grados de enriquecimiento, definidos como el porcentaje de  $O_2$  de la mezcla de aire +  $O_2$  puro inyectado desde el tanque de almacenamiento. Los valores objeto de análisis se recogen en la matriz de ensayo.

**b) Caudal de gas a proceso**

El caudal de gas afecta principalmente a la velocidad de paso del gas a través de los equipos y tuberías, siendo clave en las condiciones operativas de una absorción química del  $CO_2$  o cualquier otro proceso de separación de  $CO_2$ . El caudal puede oscilar entre los 250 y los 350  $Nm^3/h$  gracias a las posibilidades que ofrece la instalación. Este rango podría ser modificado si es solicitado por otras instalaciones experimentales.

**c) Temperatura gas de proceso**

La disposición del enfriamiento de gases mediante el paso a través de dos intercambiadores independientes proporciona la posibilidad de trabajar a temperaturas distintas según las condiciones que desean ser simuladas. Pueden obtenerse gases a  $150^\circ C$  bypasando el segundo intercambiador o trabajar con temperaturas típicas de operación a la salida de un equipo industrial de desulfuración (rango  $40 - 60^\circ C$ )

**d) %  $O_2$  a la entrada de caldera**

Es posible modificar los caudales de recirculación para poder disponer de distintas concentraciones de  $O_2$  a la entrada de caldera. Es necesario garantizar que el máximo de  $O_2$  en dicha corriente nunca supere el 30% v/v.

Se plantean tres puntos de operación: concentración igual a la composición del aire, O<sub>2</sub> intermedio al 25% y O<sub>2</sub> máximo al 30%. Para este plan de pruebas no se ha tenido en cuenta esta posibilidad, ya que se pretende confirmar que es posible trabajar con concentraciones de O<sub>2</sub> en el comburente elevadas, con la consiguiente reducción en los costes de inversión de equipos y de operación.

e) **Dopado de gases SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub>**

La instalación dispone de la posibilidad de dopar los gases de combustión generados aguas abajo de la instalación. Con ello se pretende poder simular los gases obtenidos en la combustión de un amplio rango de combustibles fósiles a partir de información disponible para cada combustible a simular.

**Matriz de ensayo**

Las Tablas 5.4, 5.5 y 5.6 recogen los casos experimentales planteados para el estudio del comportamiento de la oxicomcombustión en procesos de producción energética. Como puede observarse, la rangeabilidad y alternativas de operación son muy amplias, confirmando la potencia experimental que esta herramienta de análisis posee gracias al diseño realizado.

Tabla 5.4 Matriz de ensayo I

Planificación de Pruebas	Modo de Operación	Caudal de gases (Nm <sup>3</sup> /h)	Temperatura gas proceso (°C)	Dopado NO <sub>x</sub> y SO <sub>x</sub>
Prueba 1 (Caso Base)	Aire	300	50	NO
Prueba 2	OXI 30	300	50	NO
Prueba 3	OXI 40	300	50	NO
Prueba 4	OXI 50	300	50	NO
Prueba 5	OXI 60	300	50	NO
Prueba 6	OXI 70	300	50	NO
Prueba 7	OXI 80	300	50	NO
Prueba 8	Aire	250	50	NO
Prueba 9	OXI 30	250	50	NO
Prueba 10	OXI 40	250	50	NO
Prueba 11	OXI 50	250	50	NO
Prueba 12	OXI 60	250	50	NO
Prueba 13	OXI 70	250	50	NO
Prueba 14	OXI 80	250	50	NO
Prueba 15	Aire	350	50	NO
Prueba 16	OXI 30	350	50	NO
Prueba 17	OXI 40	350	50	NO
Prueba 18	OXI 50	350	50	NO
Prueba 19	OXI 60	350	50	NO
Prueba 20	OXI 70	350	50	NO
Prueba 21	OXI 80	350	50	NO
Prueba 22	Aire	300	40	NO
Prueba 23	OXI 30	300	40	NO
Prueba 24	OXI 40	300	40	NO

Prueba 25	OXI 50	300	40	NO
Prueba 26	OXI 60	300	40	NO
Prueba 27	OXI 70	300	40	NO
Prueba 28	OXI 80	300	40	NO
Prueba 29	Aire	250	40	NO
Prueba 30	OXI 30	250	40	NO
Prueba 31	Oxi 40	250	40	NO
Prueba 32	OXI 50	250	40	NO
Prueba 33	OXI 60	250	40	NO
Prueba 34	OXI 70	250	40	NO
Prueba 35	OXI 80	250	40	NO
Prueba 36	Aire	350	40	NO
Prueba 37	OXI 30	350	40	NO
Prueba 38	Oxi 40	350	40	NO
Prueba 39	OXI 50	350	40	NO
Prueba 40	OXI 60	350	40	NO
Prueba 41	OXI 70	350	40	NO
Prueba 42	OXI 80	350	40	NO

Tabla 5.5 Matriz de ensayo II

Planificación de Pruebas	Modo de Operación	Caudal de gases (Nm <sup>3</sup> /h)	Temperatura gas proceso (°C)	Dopado NO <sub>x</sub> y SO <sub>x</sub>
Prueba 43	Aire	300	60	NO
Prueba 44	OXI 30	300	60	NO
Prueba 45	Oxi 40	300	60	NO
Prueba 46	OXI 50	300	60	NO
Prueba 47	OXI 60	300	60	NO
Prueba 48	OXI 70	300	60	NO
Prueba 49	OXI 80	300	60	NO
Prueba 50	Aire	250	60	NO
Prueba 51	OXI 30	250	60	NO
Prueba 52	Oxi 40	250	60	NO
Prueba 53	OXI 50	250	60	NO
Prueba 54	OXI 60	250	60	NO
Prueba 55	OXI 70	250	60	NO
Prueba 56	OXI 80	250	60	NO
Prueba 57	Aire	350	60	NO
Prueba 58	OXI 30	350	60	NO
Prueba 59	Oxi 40	350	60	NO
Prueba 60	OXI 50	350	60	NO
Prueba 61	OXI 60	350	60	NO
Prueba 62	OXI 70	350	60	NO
Prueba 63	OXI 80	350	60	NO
Prueba 64	Aire	300	50	SI
Prueba 65	OXI 30	300	50	SI
Prueba 66	Oxi 40	300	50	SI

Prueba 67	OXI 50	300	50	SI
Prueba 68	OXI 60	300	50	SI
Prueba 69	OXI 70	300	50	SI
Prueba 70	OXI 80	300	50	SI
Prueba 71	Aire	250	50	SI
Prueba 72	OXI 30	250	50	SI
Prueba 73	Oxi 40	250	50	SI
Prueba 74	OXI 50	250	50	SI
Prueba 75	OXI 60	250	50	SI
Prueba 76	OXI 70	250	50	SI
Prueba 77	OXI 80	250	50	SI
Prueba 78	Aire	350	50	SI
Prueba 79	OXI 30	350	50	SI
Prueba 80	Oxi 40	350	50	SI
Prueba 81	OXI 50	350	50	SI
Prueba 82	OXI 60	350	50	SI
Prueba 83	OXI 70	350	50	SI
Prueba 84	OXI 80	350	50	SI

Tabla 5.6 Matriz de ensayo III

Planificación de Pruebas	Modo de Operación	Caudal de gases (Nm <sup>3</sup> /h)	Temperatura gas proceso (°C)	Dopado NO <sub>x</sub> y SO <sub>x</sub>
Prueba 85	Aire	300	40	SI
Prueba 86	OXI 30	300	40	SI
Prueba 87	Oxi 40	300	40	SI
Prueba 88	OXI 50	300	40	SI
Prueba 89	OXI 60	300	40	SI
Prueba 90	OXI 70	300	40	SI
Prueba 91	OXI 80	300	40	SI
Prueba 92	Aire	250	40	SI
Prueba 93	OXI 30	250	40	SI
Prueba 94	Oxi 40	250	40	SI
Prueba 95	OXI 50	250	40	SI
Prueba 96	OXI 60	250	40	SI
Prueba 97	OXI 70	250	40	SI
Prueba 98	OXI 80	250	40	SI
Prueba 99	Aire	350	40	SI
Prueba 100	OXI 30	350	40	SI
Prueba 101	Oxi 40	350	40	SI
Prueba 102	OXI 50	350	40	SI
Prueba 103	OXI 60	350	40	SI
Prueba 104	OXI 70	350	40	SI
Prueba 105	OXI 80	350	40	SI
Prueba 106	Aire	300	60	SI
Prueba 107	OXI 30	300	60	SI
Prueba 108	Oxi 40	300	60	SI

Prueba 109	OXI 50	300	60	SI
Prueba 110	OXI 60	300	60	SI
Prueba 111	OXI 70	300	60	SI
Prueba 112	OXI 80	300	60	SI
Prueba 113	Aire	250	60	SI
Prueba 114	OXI 30	250	60	SI
Prueba 115	Oxi 40	250	60	SI
Prueba 116	OXI 50	250	60	SI
Prueba 117	OXI 60	250	60	SI
Prueba 118	OXI 70	250	60	SI
Prueba 119	OXI 80	250	60	SI
Prueba 120	Aire	350	60	SI
Prueba 121	OXI 30	350	60	SI
Prueba 122	Oxi 40	350	60	SI
Prueba 123	OXI 50	350	60	SI
Prueba 124	OXI 60	350	60	SI
Prueba 125	OXI 70	350	60	SI
Prueba 126	OXI 80	350	60	SI

### **Evaluación de resultados**

La instalación ha sido diseñada con el fin de poder suministrar gases en condiciones tanto de combustión convencional como en oxicomcombustión parcial a otras instalaciones experimentales que deseen desarrollar distintas capacidades de esta tecnología aplicada al campo de la generación de energía. Permite conocer las condiciones operativas en las que se encuentra cualquier punto de la instalación para cada modo de operación en cuanto a composición, temperaturas y presiones. Es posible determinar los consumos de las *utilities* (electricidad, consumo de combustible, agua de refrigeración) en cada caso. El amplio equipamiento del que dispone la instalación tanto en instrumentación como en su sistema de registro de datos la hace ser una herramienta muy potente para el fin con el que fue concebida.

La gran flexibilidad de la instalación experimental ha sido puesta de manifiesto en la amplia rangeabilidad de las variables manipulables de la instalación y en la capacidad de adaptación de la misma a las solicitudes impuestas por otras instalaciones de carácter investigador que requieran disponer de gases de combustión en condiciones similares a los que se producirían en el caso de trabajar en condiciones de oxicomcombustión.