



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

INFORME TÉCNICO

Evaluación de desempeño de la
tecnología comercial utilizando
residuos de café

ETAPA 3 Y 4 Proyecto Implementación y
Evaluación Tecnológica de Gasificación en la
Industria de Café, como alternativa para disminuir
emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)

Agradecemos



**Caracterización fisicoquímica de
broza de café procedente de las
zonas de Tarrazú de San José,
Miramar de Puntarenas y Turrialba
de Cartago**

Análisis químico	Procedimiento analítico
Metodología general de análisis	ASTM E870-82: Combustibles de madera
Recolección y preparación de muestras	ASTM E1757-01: Biomásas de madera, materiales herbáceos, residuos agroindustriales y papel de desecho
Análisis próximo: contenido de humedad, cenizas, materias volátiles y carbono fijo	E871-82: Combustibles derivados de madera E1755-01: Biomásas de madera, materiales herbáceos, residuos agroindustriales y papel de desecho E872-82: Combustibles derivados de madera
Análisis último: análisis elemental	CIA-SC09-01-01-P10: Abonos orgánicos (Método interno del Centro de Investigaciones en Agronomía, de la Universidad de Costa Rica)
Análisis de metales	ICP: Matrices acuosas (Método interno del Centro de Electroquímica y Energía Química, de la Universidad de Costa Rica)
Carbohidratos estructurales: hemicelulosa, celulosa y lignina	AOAC 973.18: Fibra ácida detergente y lignina en alimento animal (Centro de Investigación en Nutrición Animal)

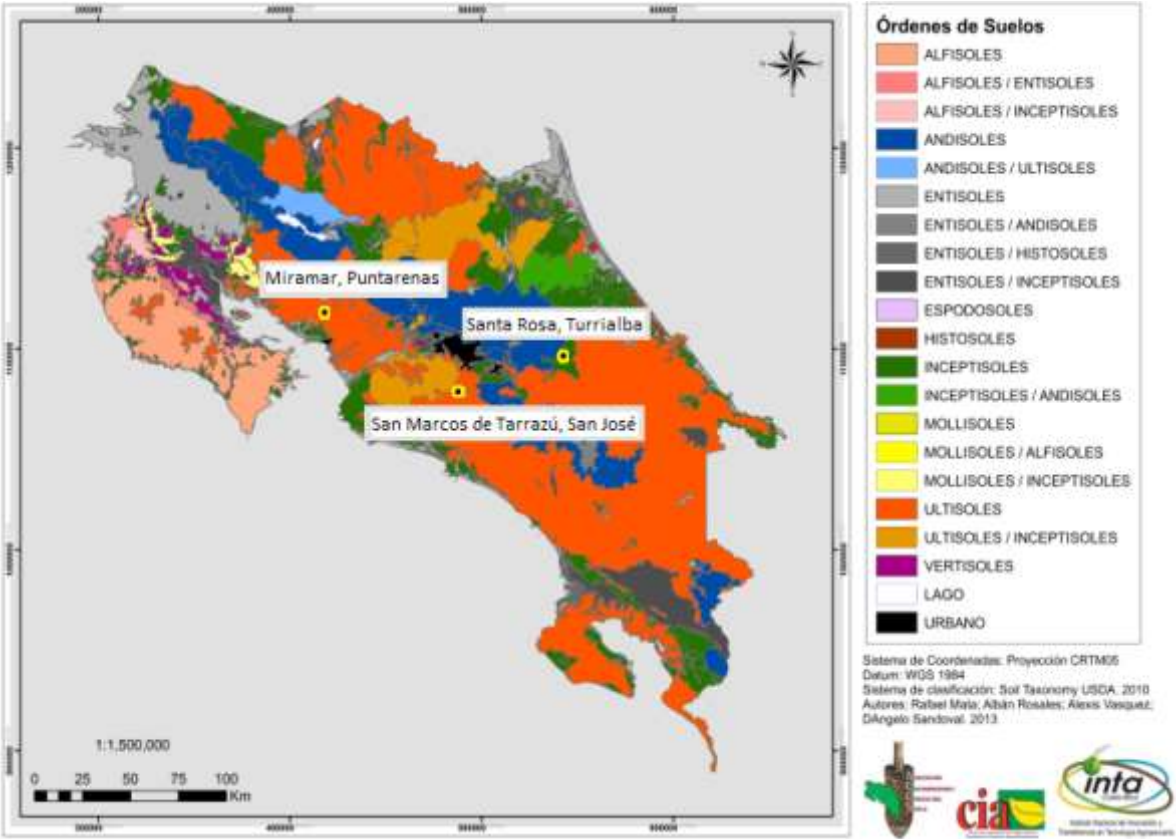
Poder calorífico



ASTM D240-14: Combustibles de hidrocarburos líquidos-correcto
(Centro de Electroquímica y Energía Química)

Características de las zonas geográficas de estudio

Parámetro	Zona geográfica		
	San Marcos de Tarrazú, San José	Santa Rosa, Turrialba	Miramar, Puntarenas
Altitud (msnm)	1200 – 1900	500 – 1400	340
Precipitación (mm)	3400	2800	3500
Temperatura (°C)	18	23	31
Humedad relativa (%)	75	82	60 – 80



Contenido de humedad

HUMEDAD INICIAL

Cuadro 1. Contenido de humedad inicial para muestras de broza de café y chips de madera

Muestra	Contenido de humedad inicial (%)
BROZA DE CAFÉ - C1 - TARRAZÚ	85.0
BROZA DE CAFÉ - C2 - TARRAZÚ	84.6
BROZA DE CAFÉ - C3 - TARRAZÚ	83.1
BROZA DE CAFÉ - Mi1 - MIRAMAR	86.8
BROZA DE CAFÉ - Mi2 - MIRAMAR	85.8
BROZA DE CAFÉ - Mi3 - MIRAMAR	85.2
BROZA DE CAFÉ - T1 - TURIALBA	77.2
BROZA DE CAFÉ - T2 - TURRIALBA	76.1
BROZA DE CAFÉ - T3 – TURRIALBA	77.1
CHIPS DE MADERA – M1 – C	29.2
Metodología de análisis:	ASTM E1757

HUMEDAD INICIAL



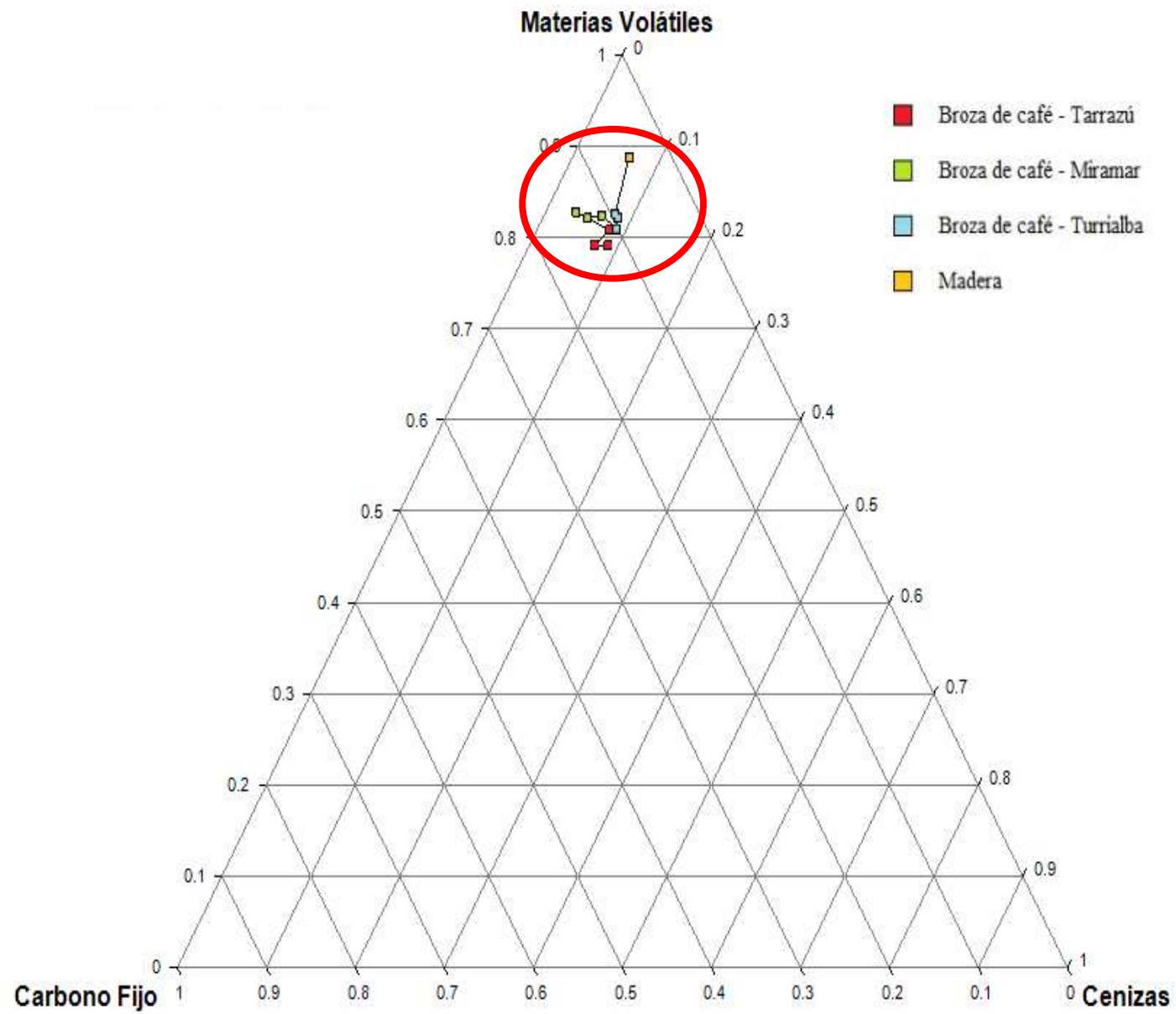
Condición clave para tomar en cuenta en el secado y densificado de las muestras

*Análisis próximo: Contenido de humedad,
cenizas, materias volátiles y carbono fijo
para muestras de chips de broza*

ANÁLISIS PRÓXIMO

Cuadro 2. Resultados del análisis próximo para muestras de broza de café y chips de madera

Muestra	Contenido de sólidos totales (%)	Contenido de humedad (%)	Contenido de cenizas (%)	Contenido de materias volátiles (%)	Contenido de carbono fijo (%)
BROZA DE CAFÉ - C1 - TARRAZÚ	86.63	13.37	12.00	79.16	8.84
BROZA DE CAFÉ - C2 - TARRAZÚ	86.40	13.60	13.55	79.15	7.30
BROZA DE CAFÉ - C3 - TARRAZÚ	87.75	12.25	11.06	80.82	8.12
BROZA DE CAFÉ - Mi1 - MIRAMAR	90.67	9.33	13.80	82.80	3.41
BROZA DE CAFÉ - Mi2 - MIRAMAR	89.90	10.10	12.83	82.13	5.03
BROZA DE CAFÉ - Mi3 - MIRAMAR	90.22	9.78	11.14	82.43	6.43
BROZA DE CAFÉ - T1 - TURIALBA	86.36	13.64	10.17	80.96	8.87
BROZA DE CAFÉ - T2 - TURRIALBA	86.65	13.35	9.39	82.23	8.38
BROZA DE CAFÉ - T3 - TURRIALBA	86.36	13.64	9.47	82.63	7.90
CHIPS DE MADERA – M1 - C	91.24	8.76	4.84	88.82	6.35
Metodología de análisis:	ASTM E1756	ASTM E871	ASTM 1755	ASTM E872	ASTM E870



Análisis elemental: CHONS

ANÁLISIS ELEMENTAL

Cuadro 3. Resultados del análisis químico de abonos orgánicos (por elemento) para muestras de broza de café y chips de madera

Muestra	%						mg/kg					
	N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B	
BROZA DE CAFÉ - C1 - TARRAZÚ	2.47	0.14	0.50	0.14	3.98	0.20	152	21	691	75	42	
BROZA DE CAFÉ - C2 - TARRAZÚ	2.39	0.16	0.46	0.14	4.40	0.20	172	18	874	42	38	
BROZA DE CAFÉ - C3 - TARRAZÚ	2.41	0.14	0.50	0.14	4.00	0.20	589	22	1336	68	40	
BROZA DE CAFÉ - Mi1 - MIRAMAR	2.39	0.22	0.52	0.12	4.80	0.22	90	19	10	62	28	
BROZA DE CAFÉ - Mi2 - MIRAMAR	2.13	0.19	0.46	0.12	4.42	0.20	116	18	10	55	26	
BROZA DE CAFÉ - Mi3 - MIRAMAR	2.34	0.21	0.51	0.13	4.74	0.22	220	20	1266	56	30	
BROZA DE CAFÉ - T1 - TURIALBA	2.27	0.19	0.59	0.19	2.40	0.26	430	21	289	110	50	
BROZA DE CAFÉ - T2 - TURIALBA	2.32	0.16	0.54	0.17	2.18	0.18	284	20	226	100	40	
BROZA DE CAFÉ - T3 - TURIALBA	2.14	0.14	0.48	0.16	2.11	0.16	234	17	188	92	39	
CHIPS DE MADERA - M1 - C	0.59	0.08	0.97	0.12	0.43	0.10	1179	16	39	103	16	
Metodología de análisis:	CIA-SC09-01-01-P10											

Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA)

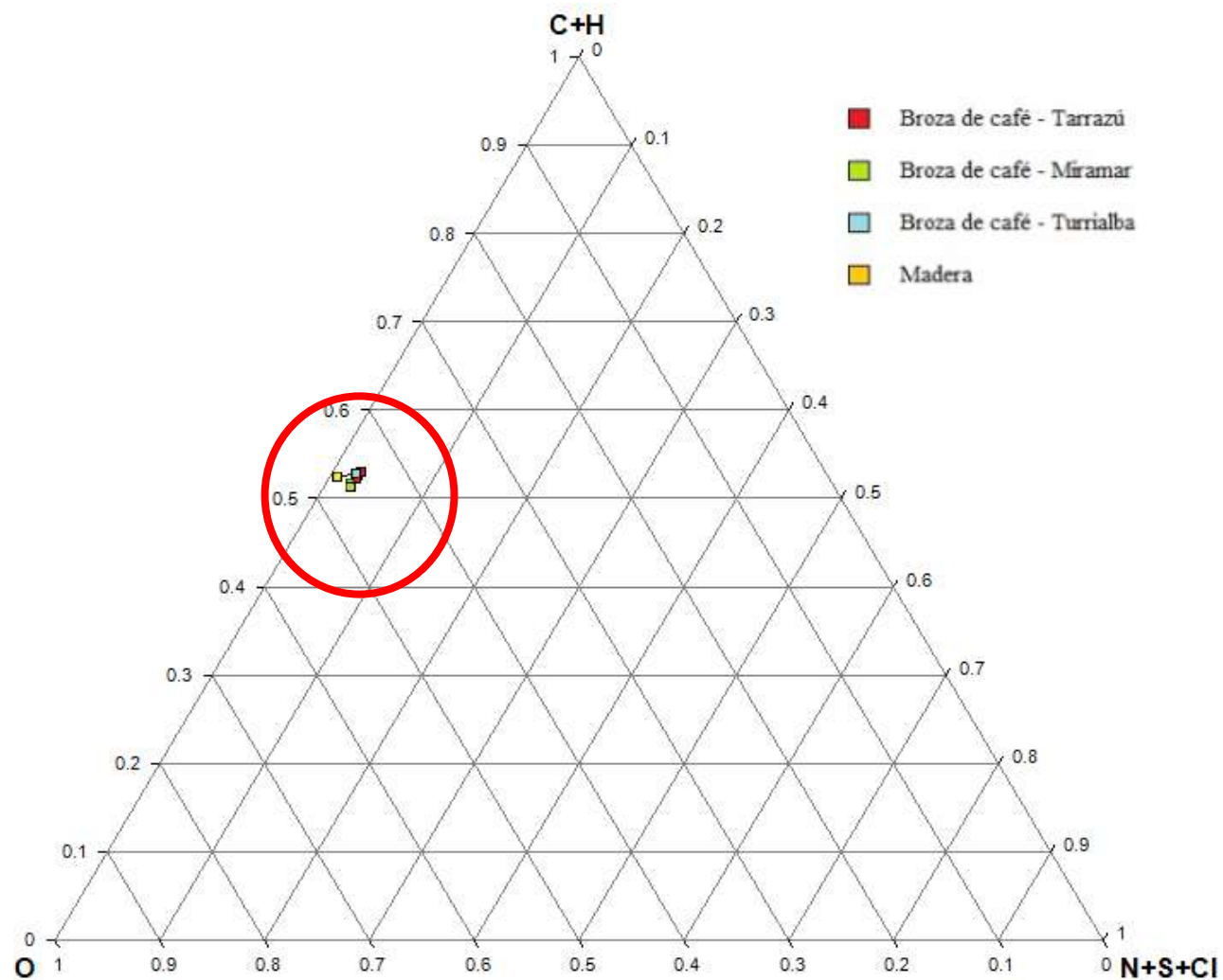
Figura 3.1. Composición química de la biomasa (Jara, 2009)

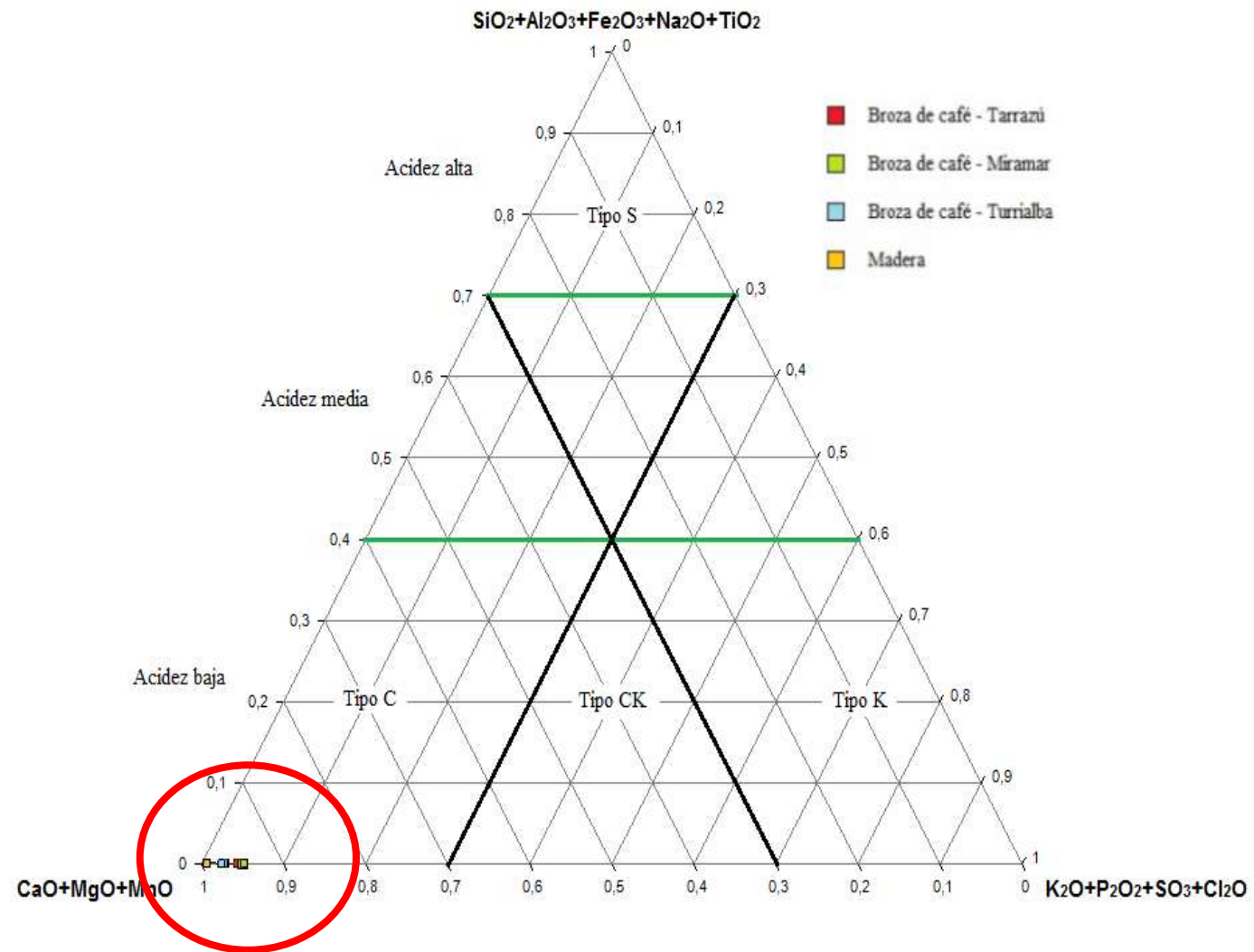
BIOMASA	C % peso	H % peso	O % peso	S % peso	N % peso	Cenizas % peso	Cl mg/kg seco	K mg/kg seco
Maderas Coníferas	50	6	40	0,09	0,7	3,3	310	1570
Maderas Tropicales	52,4	5,7	39,8	0,01	0,3	1,8	50	3380
Olivo	49,8	6	40,4	0,06	0,7	3	350	8710
Paja de Trigo	45,6	5,7	40	0,09	0,7	7,9	2210	16200
Paja de Cebada	45,6	5,6	42,5	0,09	0,5	5,7	4720	16700
Tabaco	49,2	5,7	42,1	0,04	0,6	2,4	150	2830

Figura 3.2. Agrupación por región de potasio en el suelo (Chaves-CICAPE, 2014)

Cuadro 11. Agrupamiento por región del contenido de potasio en el suelo.

Región	n	Rango cmol(+) / L	cv (%)	Media cmol(+) / L	% Muestras			
					Bajas	Medio Bajas	Medio Altas	Altas
					≤ 0,20 cmol(+) / L	0,21-0,30 cmol(+) / L	0,31-0,40 cmol(+) / L	> 0,40 cmol(+) / L
Los Santos	1268	0,03-2,17	55,2	0,51	10,9	16,3	15,5	57,3
Los Santos Norte	1285	0,09-5,77	66,8	0,75	2,7	7,6	10,5	79,1
Coto Brus	972	0,02-2,42	67,2	0,29	38,3	28,3	15,0	18,4
Pérez Zeledón	1364	0,01-3,96	88,7	0,38	37,8	19,3	12,6	30,3
Valle Central Occidental	2120	0,00-14,52	100,8	0,62	12,1	11,9	13,6	62,5
Valle Central	1549	0,02-3,46	62,3	0,61	8,7	10,8	13,3	67,1
Turrialba y Valle de Oro	831	0,00-1,24	73,6	0,35	35,7	15,6	12,9	35,7
Zona Norte, Península	113	0,07-1,91	73,5	0,41	28,3	17,7	13,3	40,7
Zona Norte, Tilarán	78	0,10-1,62	69,7	0,38	23,1	26,9	19,2	30,8
Zona Norte, Miramar	9	0,09-0,85	68,9	0,37	33,3	22,2	11,1	33,3
Zona Norte, San Carlos	18	0,09-0,47	48,6	0,25	38,9	27,8	22,2	11,1
Total	9607	0,00-14,52	75,9	0,52	18,8	15,0	13,4	52,8





Análisis de metales

ANÁLISIS DE METALES

Cuadro 5. Resultados del análisis de metales mediante ICP para las muestras de broza de café y chips de madera

Muestra	mg/kg				
	Al	Sb	As	Bi	Cd
BROZA DE CAFÉ - C1 - TARRAZÚ	16.1 ± 0.5	ND (<0.4 mg/L)	ND (Ver nota 2)	ND (<0.2 mg/L)	ND (<0.5mg/L)
BROZA DE CAFÉ - C2 - TARRAZÚ	11.2 ± 0.6	ND (<0.4 mg/L)	ND (Ver nota 2)	ND (<0.2 mg/L)	ND (<0.5mg/L)
BROZA DE CAFÉ - C3 - TARRAZÚ	16.5 ± 0.6	ND (<0.4 mg/L)	ND (Ver nota 2)	ND (<0.2 mg/L)	ND (<0.5mg/L)
BROZA DE CAFÉ - Mi1 - MIRAMAR	12.5 ± 0.6	ND (<0.4 mg/L)	ND (Ver nota 2)	ND (<0.2 mg/L)	ND (<0.5mg/L)
BROZA DE CAFÉ - Mi2 - MIRAMAR	34.4 ± 0.6	ND (<0.4 mg/L)	ND (Ver nota 2)	ND (<0.2 mg/L)	ND (<0.5mg/L)
BROZA DE CAFÉ - Mi3 - MIRAMAR	12.2 ± 0.6	ND (<0.4 mg/L)	ND (Ver nota 2)	ND (<0.2 mg/L)	ND (<0.5mg/L)
BROZA DE CAFÉ - T1 - TURRIALBA	207 ± 9	ND (<2.1mg/kg)	-	ND (<1.3 mg/kg)	ND (<3.1 mg/kg)
BROZA DE CAFÉ - T2 - TURRIALBA	150 ± 7	ND (<2.1mg/kg)	-	ND (<1.3 mg/kg)	ND (<3.1 mg/kg)
BROZA DE CAFÉ - T3 - TURRIALBA	131 ± 7	ND (<2.1mg/kg)	-	ND (<1.3 mg/kg)	ND (<3.1 mg/kg)
CHIPS DE MADERA – M1 - C	68 ± 4	ND (<2.1mg/kg)	-	ND (<1.3 mg/kg)	ND (<3.1 mg/kg)
Metodología de análisis:	ICP				

Nota 1: El valor de la incertidumbre se calcula a partir de la desviación estándar para al menos tres repeticiones y t al 95% ($\pm t*s/\sqrt{n}$).

Nota 2: Este elemento no se puede determinar mediante la técnica de digestión utilizada para procesar la muestra.

Cuadro 5. (Continuación) Resultados del análisis de metales mediante ICP para las muestras de broza de café y chips de madera

Muestra	mg/kg				
	Ca	Co	Cu	Cr	Sn
BROZA DE CAFÉ - C1 - TARRAZÚ	352 ± 20	ND (<0.7 mg/L)	ND (<0.6 mg/L)	ND (<1 mg/L)	2.8 ± 0,6
BROZA DE CAFÉ - C2 - TARRAZÚ	325 ± 11	ND (<0.7 mg/L)	ND (<0.6 mg/L)	ND (<1 mg/L)	2.9 ± 0.6
BROZA DE CAFÉ - C3 - TARRAZÚ	348 ± 17	ND (<0.7 mg/L)	ND (<0.6 mg/L)	ND (<1 mg/L)	4.9 ± 0.6
BROZA DE CAFÉ - Mi1 - MIRAMAR	410 ± 12	ND (<0.7 mg/L)	ND (<0.6 mg/L)	ND (<1 mg/L)	2.5 ± 0.6
BROZA DE CAFÉ - Mi2 - MIRAMAR	366 ± 20	ND (<0.7 mg/L)	ND (<0.6 mg/L)	ND (<1 mg/L)	3.1 ± 0.6
BROZA DE CAFÉ - Mi3 - MIRAMAR	399 ± 22	ND (<0.7 mg/L)	ND (<0.6 mg/L)	ND (<1 mg/L)	3.6 ± 0.6
BROZA DE CAFÉ - T1 - TURRIALBA	(0.45± 0.03)% masa	ND (<4mg/kg)	15± 1	ND (<4.8mg/kg)	103 ± 9
BROZA DE CAFÉ - T2 - TURRIALBA	(0.50± 0.04)% masa	ND (<4mg/kg)	13± 1	ND (<4.8mg/kg)	67 ± 5
BROZA DE CAFÉ - T3 - TURRIALBA	(0.50± 0.01)% masa	ND (<4mg/kg)	15± 1	ND (<4.8mg/kg)	58 ± 3
CHIPS DE MADERA – M1 - C	(0.56 ± 0.04)% masa	ND (<4mg/kg)	4.7 ± 0.3	ND (<4.8mg/kg)	127 ± 8
Metodología de análisis:	ICP				

ND: Este elemento no se puede determinar mediante la técnica de digestión utilizada para procesar la muestra.

Cuadro 5. (Continuación)

Muestra	mg/kg				
	Fe	Mg	Mn	Hg	Mo
BROZA DE CAFÉ - C1 - TARRAZÚ	8.7 ± 0.6	117 ± 6	4.9 ± 0.3	ND (Ver nota 2)	ND (<1.3 mg/L)
BROZA DE CAFÉ - C2 - TARRAZÚ	8.7 ± 0.6	109 ± 6	ND (<0.6 mg/L)	ND (Ver nota 2)	ND (<1.3 mg/L)
BROZA DE CAFÉ - C3 - TARRAZÚ	13.7 ± 0.6	121 ± 5	4.1 ± 0.3	ND (Ver nota 2)	ND (<1.3 mg/L)
BROZA DE CAFÉ - MI1 - MIRAMAR	7.4 ± 0.6	108 ± 7	5.3 ± 0.3	ND (Ver nota 2)	ND (<1.3 mg/L)
BROZA DE CAFÉ - MI2 - MIRAMAR	9.4 ± 0.6	102 ± 6	4.0 ± 0.3	ND (Ver nota 2)	ND (<1.3 mg/L)
BROZA DE CAFÉ - MI3 - MIRAMAR	11.0 ± 0.6	102 ± 4	3.4 ± 0.3	ND (Ver nota 2)	ND (<1.3 mg/L)
BROZA DE CAFÉ - T1 - TURRIALBA	342 ± 9	(0.15 ± 0.01) % masa	71 ± 5	-	ND (<1.7mg/kg)
BROZA DE CAFÉ - T2 - TURRIALBA	243 ± 14	(0.17 ± 0.01) % masa	76 ± 4	-	ND (<1.7mg/kg)
BROZA DE CAFÉ - T3 - TURRIALBA	243 ± 9	(0.16 ± 0.01) % masa	78 ± 5	-	ND (<1.7mg/kg)
CHIPS DE MADERA – M1 - C	499 ± 14	703 ± 14	50 ± 1	-	ND (<1.7mg/kg)
Metodología de análisis:	ICP				

ND: Este elemento no se puede determinar mediante la técnica de digestión utilizada para procesar la muestra.

Cuadro 5. (Continuación)

Muestra	mg/kg			Na	Zn
	Pb	K (% masa)	Se		
BROZA DE CAFÉ - C1 - TARRAZÚ	ND (<0.3 mg/L)	0.33 ± 0.04	ND (Ver nota 2)	46 ± 3	29 ± 3
BROZA DE CAFÉ - C2 - TARRAZÚ	ND (<0.3 mg/L)	0.38 ± 0.04	ND (Ver nota 2)	33 ± 3	69 ± 3
BROZA DE CAFÉ - C3 - TARRAZÚ	ND (<0.3 mg/L)	0.34 ± 0.04	ND (Ver nota 2)	45 ± 3	51 ± 3
BROZA DE CAFÉ - Mi1 - MIRAMAR	ND (<0.3 mg/L)	0.46 ± 0.04	ND (Ver nota 2)	38 ± 3	ND (<0.9 mg/L)
BROZA DE CAFÉ - Mi2 - MIRAMAR	ND (<0.3 mg/L)	0.43 ± 0.04	ND (Ver nota 2)	53 ± 3	5.3 ± 0.1
BROZA DE CAFÉ - Mi3 - MIRAMAR	ND (<0.3 mg/L)	0.41 ± 0.04	ND (Ver nota 2)	42 ± 3	63 ± 3
BROZA DE CAFÉ - T1 - TURRIALBA	ND (<1.0 mg/kg)	2 ± 0.1	-	355 ± 14	14 ± 2
BROZA DE CAFÉ - T2 - TURRIALBA	ND (<1.0 mg/kg)	2 ± 0.1	-	370 ± 10	13 ± 1
BROZA DE CAFÉ - T3 - TURRIALBA	ND (<1.0 mg/kg)	1.9 ± 0.1	-	320 ± 6	13 ± 1
CHIPS DE MADERA – M1 - C	ND (<1.0 mg/kg)	0.11 ± 0.02	-	515 ± 14	14.8 ± 0.6
Metodología de análisis:	ICP				

ND: Este elemento no se puede determinar mediante la técnica de digestión utilizada para procesar la muestra.

*Carbohidratos estructurales: lignina,
hemicelulosa, celulosa*

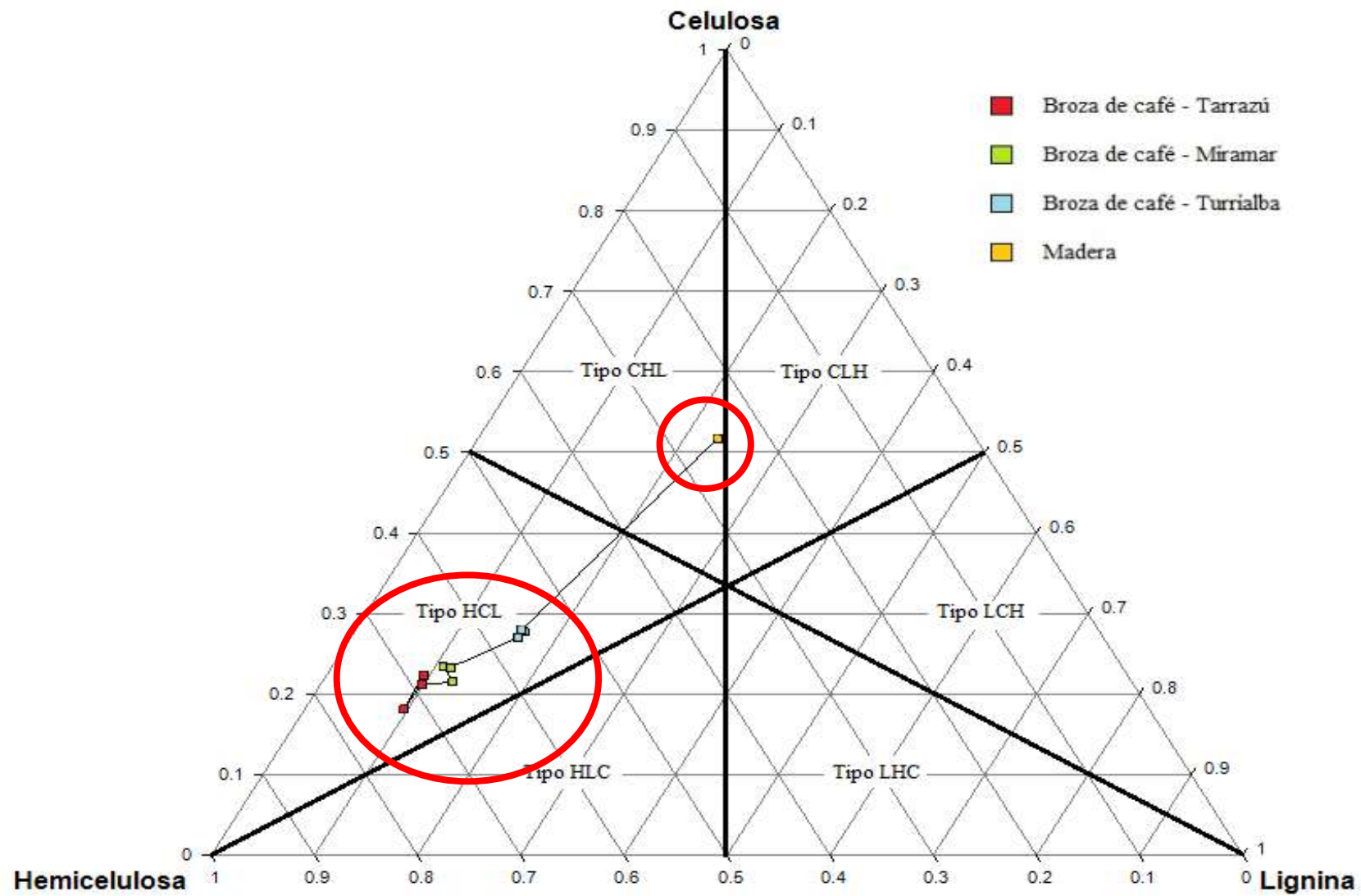
ANÁLISIS DE CARBOHIDRATOS ESTRUCTURALES

Cuadro 6. Contenido de carbohidratos estructurales para muestras de broza de café y chips de madera

Muestra	Contenido de hemicelulosa (%)	Contenido de celulosa (%)	Contenido de lignina (%)
BROZA DE CAFÉ - C1 - TARRAZÚ	12.6	22.4	9.4
BROZA DE CAFÉ - C2 - TARRAZÚ	11.7	18.1	9.6
BROZA DE CAFÉ - C3 - TARRAZÚ	12.8	21.2	9.8
BROZA DE CAFÉ - Mi1 - MIRAMAR	13.6	21.5	12.7
BROZA DE CAFÉ - Mi2 - MIRAMAR	13.3	23.4	10.8
BROZA DE CAFÉ - Mi3 - MIRAMAR	13.8	23.3	11.5
BROZA DE CAFÉ - T1 - TURRIALBA	13.7	27.0	16.2
BROZA DE CAFÉ - T2 - TURRIALBA	13.8	27.7	16.5
BROZA DE CAFÉ - T3 - TURRIALBA	15.2	27.9	16.1
CHIPS DE MADERA – M1 - C	12.2	51.7	23.2
Metodología de análisis:	AOAC 973.18		

Figura 6.1. Análisis químico de diferentes biomásas (Rodríguez et. al, 2012)

Muestra	% Extraíbles	% Holocelulosa	% Celulosa	% Hemicelulosa	% Lignina
Raspón de vid	39.34	37 ± 8	34.82	10.77	42.5 ± 0.3
Harina de granilla de uva	9.82	63 ± 3	45 ± 5	19 ± 4	55.1 ± 0.7
Hueso de almazara seco y sin pulpa	2.30	88 ± 1	61 ± 2	27 ± 2	33.2 ± 0.9
Hueso de extractora	36.84	73.4 ± 0.4	41 ± 5	32 ± 5	34 ± 3
Hueso de almazara (ar)	7.99	89 ± 1	55 ± 10	34 ± 10	34.7 ± 0.5
Orujillo extractado	67.79	53 ± 10	26 ± 5	33.2 ± 0.8	40 ± 1
Pellets de poda de olivo	13.51	81.5 ± 0.6	67.4 ± 0.4	14.2 ± 0.7	32 ± 1
Orojo de uva	26.06	42 ± 4	25.64	20.13	47 ± 2
Pellets de orujillo extractado	55.96	64 ± 4	32 ± 4	32 ± 3	38.1 ± 0.5



*Poder
calorífico*

ANÁLISIS DE PODER CALÓRICO

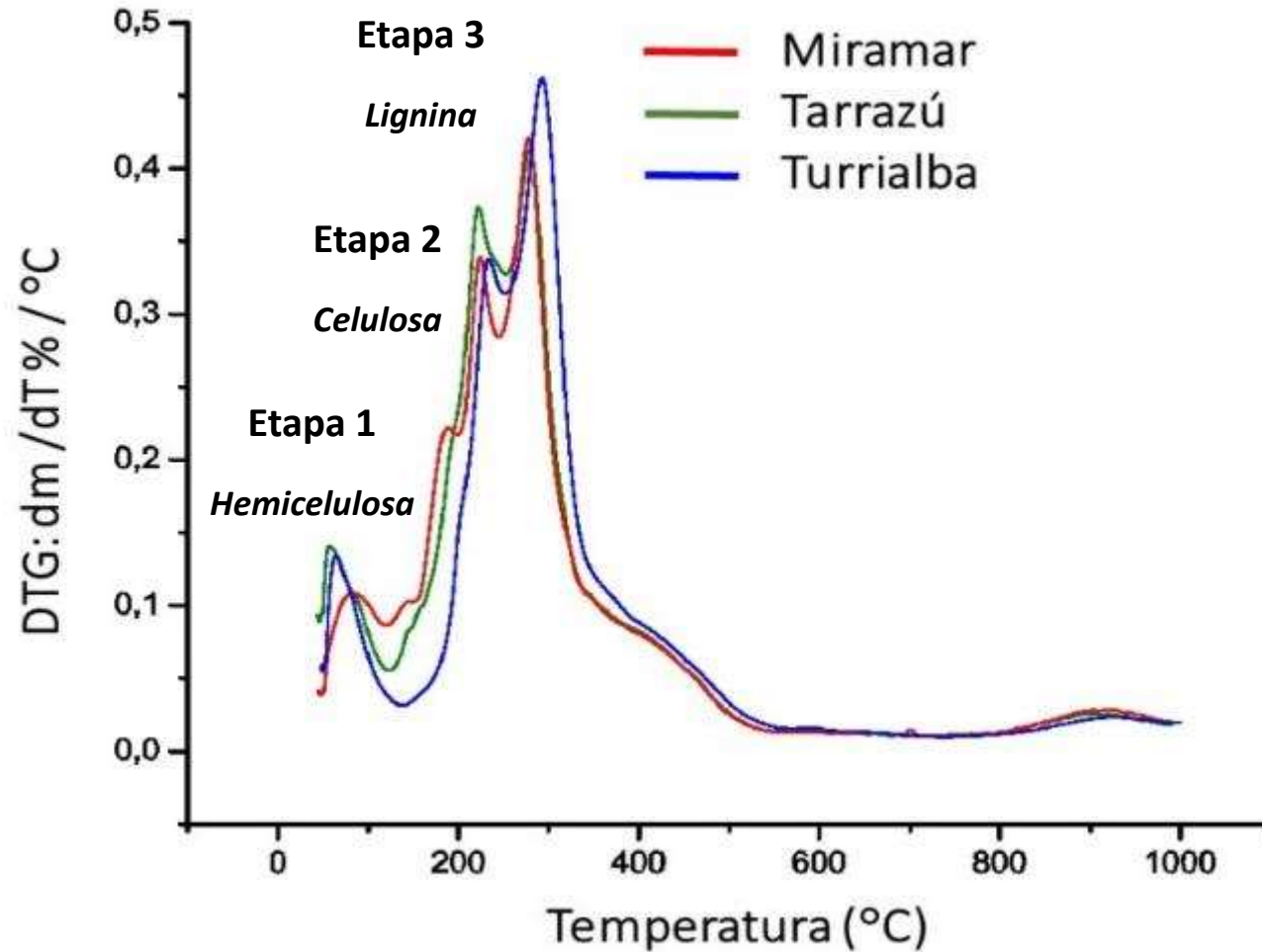
Cuadro 7. Resultados de la determinación del poder calórico para muestras de broza de café y chips de madera

Muestra	Calor de combustión (MJ/kg)
BROZA DE CAFÉ - C1 - TARRAZÚ	16.7 ± 0.2
BROZA DE CAFÉ - C2 - TARRAZÚ	16.3 ± 0.2
BROZA DE CAFÉ - C3 - TARRAZÚ	16.5 ± 0.2
BROZA DE CAFÉ - Mi1 - MIRAMAR	16.2 ± 0.2
BROZA DE CAFÉ - Mi2 - MIRAMAR	16.2 ± 0.2
BROZA DE CAFÉ - Mi3 - MIRAMAR	17.0 ± 0.2
BROZA DE CAFÉ - T1 - TURIALBA	16.2± 0.2
BROZA DE CAFÉ - T2 - TURRIALBA	16.0± 0.2
BROZA DE CAFÉ - T3 - TURRIALBA	16.9± 0.2
CHIPS DE MADERA – M1 - C	14.3± 0.2
Metodología de análisis:	ASTM D240



Descomposición térmica: Termogravimetría (TGA)

DEGRADACIÓN TÉRMICA E LA BROZA: TGA



Existe diferencia en los patrones de degradación térmica de la broza según su procedencia debido a las distinta composición de carbohidratos y metales presentada por cada zona del país, esta diferencia se evidencia más para la broza proveniente de Miramar

Según la literatura a mayor contenido de potasio, calcio y sodio en la muestra disminuye la temperatura de degradación. El efecto contrario se observa para mayores contenidos de Magnesio.

Conclusiones de Caracterización

- Importancia: estandarizar institucionalmente metodologías para caracterización
- Carbohidratos Estructurales- alto potencial para aprovechamiento energético, no afecta desempeño de condiciones de operación en gasificador de lecho descendente
- Prensado (pérdida 50%-jugo)— secado solar mejora sustancialmente eficiencia
- Ceniza- alto potencial como fertilizante en el cafetal (como biochar—estable no se descompone)
- Metales- efecto catalítico para mejorar el proceso



Implementación y Evaluación Tecnológica de Gasificación en la Industria de Café

(Alternativa para disminuir
emisiones de GEI)



**REACTOR → PROTOTIPO
COMERCIAL**

Converts dense biomass like wood chips and nut shells into electricity and heat. It is a compact, integrated system – from biomass in, to power out – delivered at the breakthrough **price of \$1-\$2/watt**.



UCR

Contenido INFORME

1. Introducción
2. Operación térmica
 1. Caracterización del sistema en operación térmica
 2. Consideraciones operacionales
 3. Conclusiones y recomendaciones
3. Modificaciones al sistema
 1. Deficiencias en el diseño original ante la operación con pellets de broza
 2. Sistema de limpieza
 1. Filtros
 2. "Bypass" y Enfriador
 3. Consideraciones operacionales
 4. Conclusiones y recomendaciones
4. Operación con generación eléctrica
 1. Caracterización del sistema en operación con generación eléctrica
 2. Balances de masa
 3. Correlaciones estadísticas
 4. Consideraciones operacionales
 5. Conclusiones





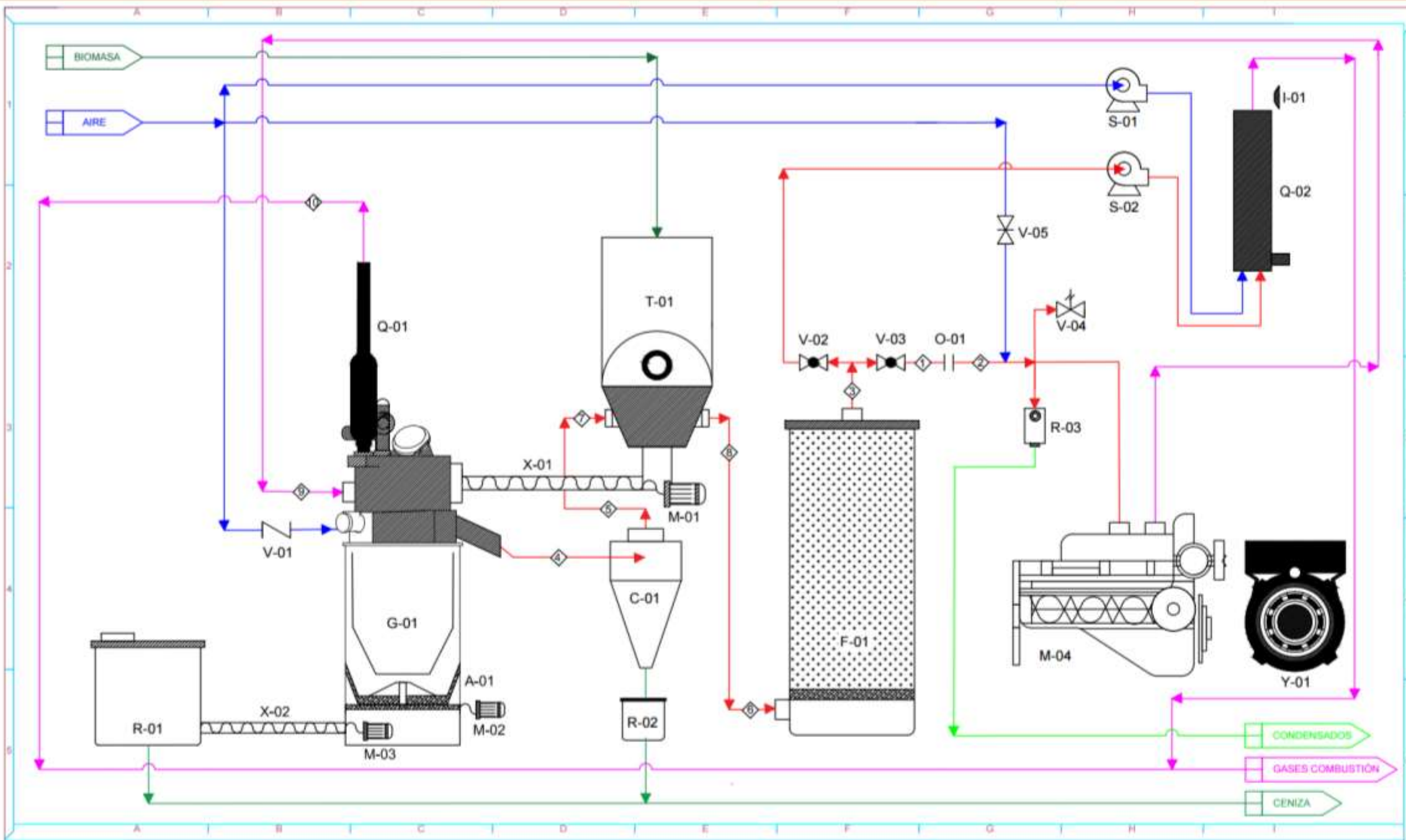
1. Introducción

- Evaluación y modificación del **sistema de monitoreo y adquisición de datos** para la generación de la información técnica requerida.
- Realización de un diseño experimental para evaluar la estabilidad y **características de los pellets** elaborados a partir de broza seca de café y mezclas con cascarilla.
- Establecimiento del diseño experimental para la **evaluación del desempeño** del sistema de reacción.
- Preparación de la materia prima en los lotes y sus **niveles de mezcla** según las corridas requeridas y las condiciones necesarias establecidas.
- Realización de corridas experimentales para evaluar la **composición y producción de gas de síntesis**, considerando los porcentajes de mezcla broza-cascarilla.

1. Introducción

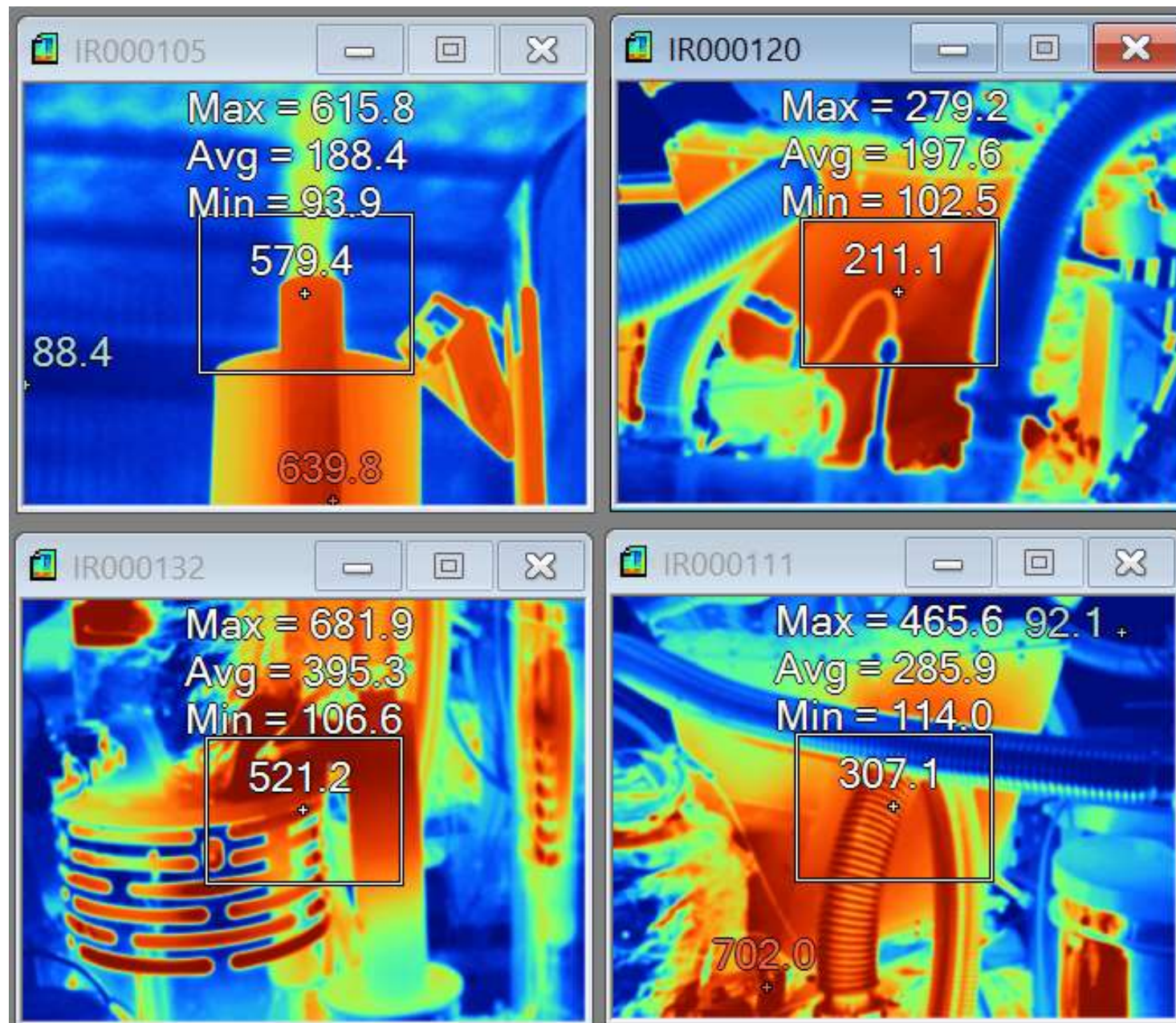
- Cuantificación de residuos asociados **al proceso**, análisis de durabilidad, tiempos de corrida estable, insumos de mantenimiento, entre otros.
- Establecer las **mejoras operativas** del proceso con el objetivo de mantener la estabilidad del sistema y la tecnología propuesta por los fabricantes de un reactor de lecho descendente.
- Propuesta y evaluación de sistema de **limpieza preliminar** que antecede al generador de electricidad para realizar corridas con broza seca de café.
- Realizar corridas para evaluar **la estabilidad del sistema** y la producción de electricidad según las condiciones de operación establecidas experimentalmente.
- **Análisis** de los resultados experimentales del sistema.





NOMENCLATURA	
IDEN	DESCRIPCIÓN
A-01	Agitador de ceniza
C-01	Ciclón
F-01	Filtro de gas síntesis
G-01	Reactor
I-01	Ignidor
M-01	Motor tornillo alimentación
M-02	Motor del agitador de cenizas
M-03	Motor tornillo cenizas
M-04	Motor generador
R-01	Recolector de cenizas
R-02	Recolector de cenizas
R-03	Recolector de condensados
S-01	Soplador de aire
S-02	Soplador de gas síntesis
T-01	Tolva
V-01	Válvula check para aire
V-02	Válvula de bola
V-03	Válvula de bola
V-04	Válvula de alivio
V-05	Válvula mariposa de control
O-01	Medidor de orificio
Q-01	Quemador gases combustión
Q-02	Quemador gases combustión
X-01	Tornillo sinfin
X-02	Tornillo sinfin
Y01	Generador

Imágenes IR



2.1. Caracterización del sistema en operación térmica

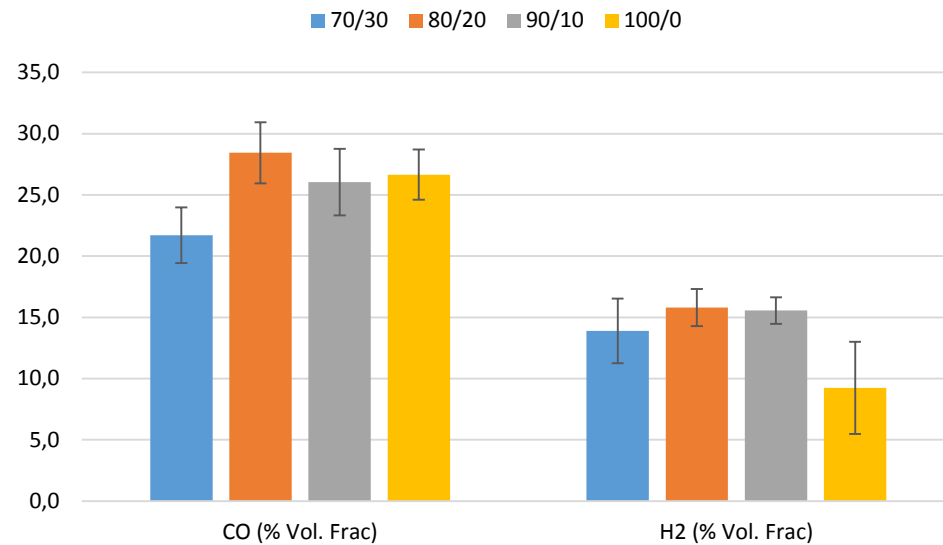


Figura 2.1.1 Fracciones volumétricas de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂) del syngas limpio y seco obtenido durante las corridas en operación térmica de acuerdo a la mezcla broza/cascarilla utilizada.

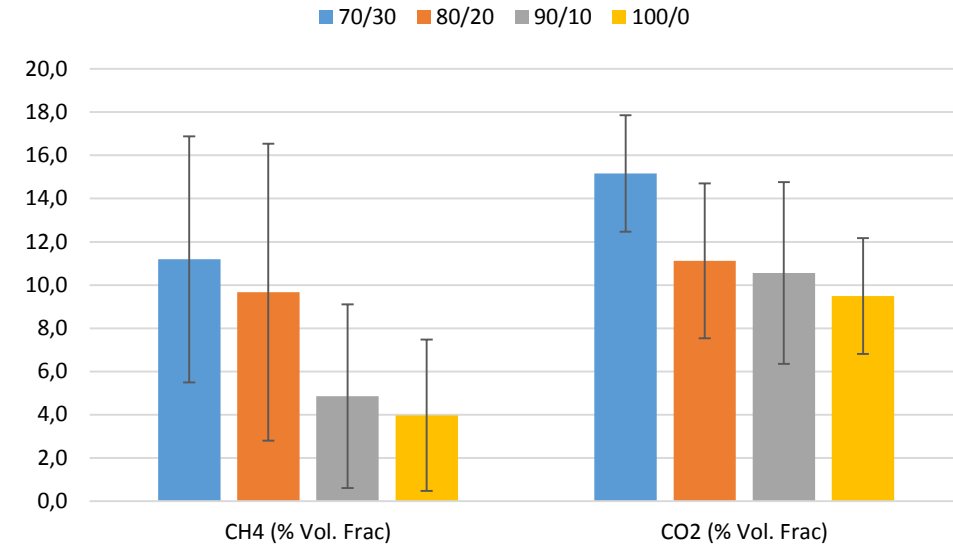


Figura 2.1.2. Fracciones volumétricas de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) del syngas limpio y seco obtenido durante las corridas en operación térmica de acuerdo a la mezcla broza/cascarilla utilizada.

2.1. Caracterización del sistema en operación térmica

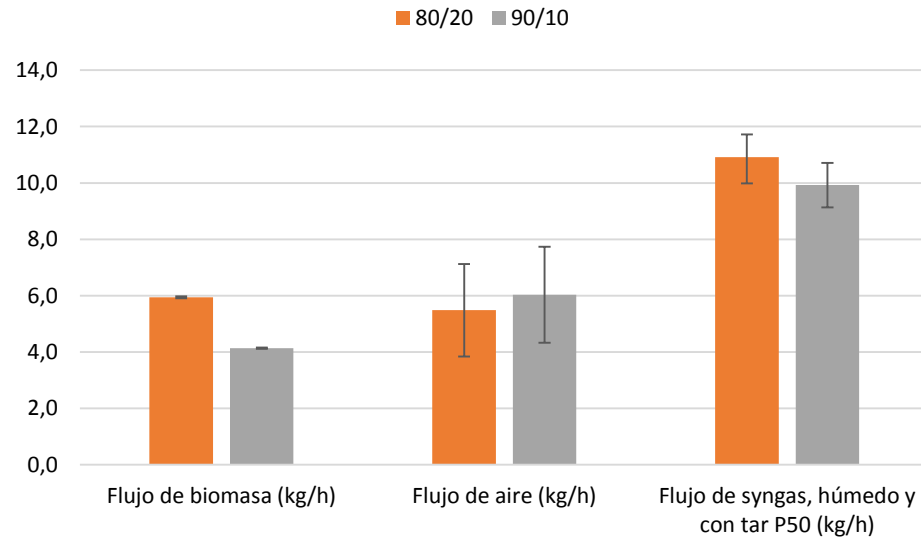


Figura 2.1.3. Tasa de consumo de biomasa y aire, y tasa de producción de syngas húmedo y con alquitranes, durante las corridas en operación térmica de acuerdo a la mezcla broza/cascarilla utilizada.

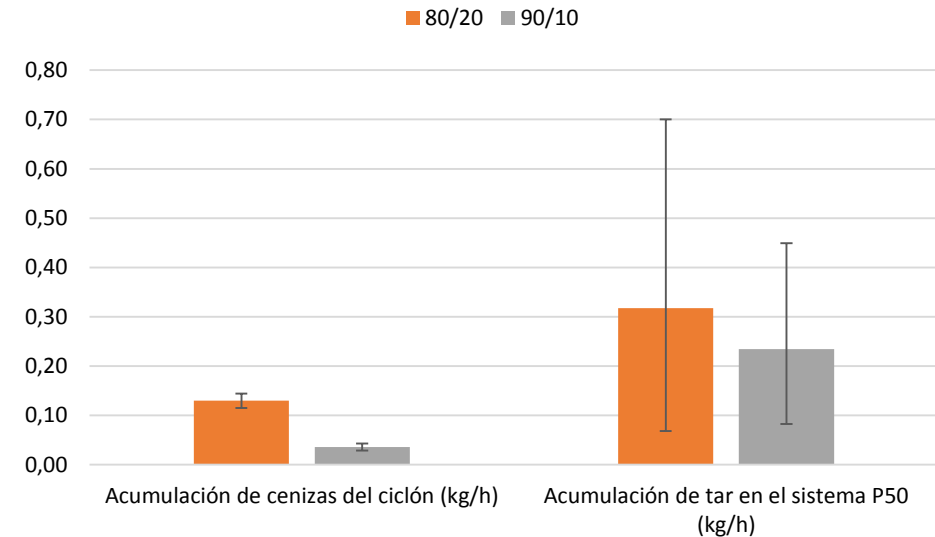


Figura 2.1.4. Tasa de acumulación de cenizas en el ciclón y alquitranes húmedos en el sistema, durante las corridas en operación térmica de acuerdo a la mezcla broza/cascarilla utilizada.

2.1. Caracterización del sistema en operación térmica

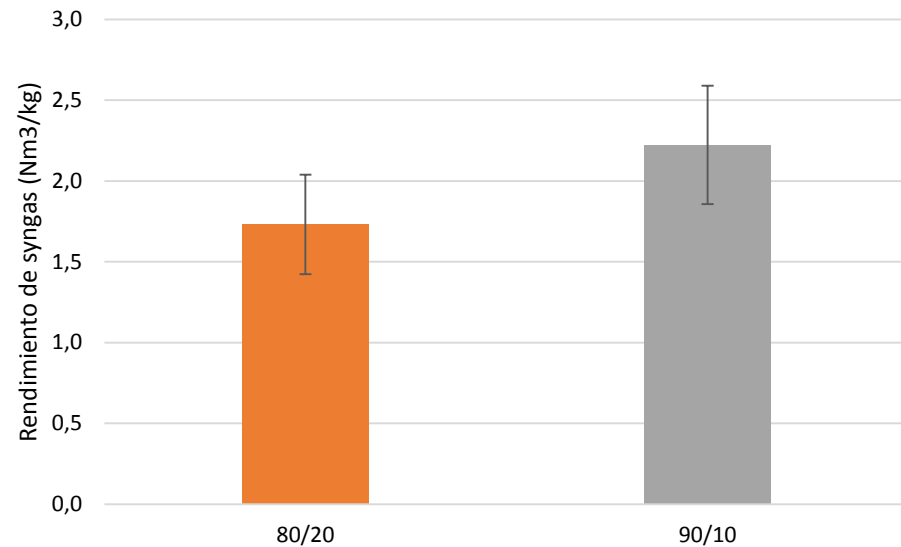


Figura 2.1.5. Rendimiento de syngas para las corridas en operación térmica con las mezclas 80/20 y 90/10

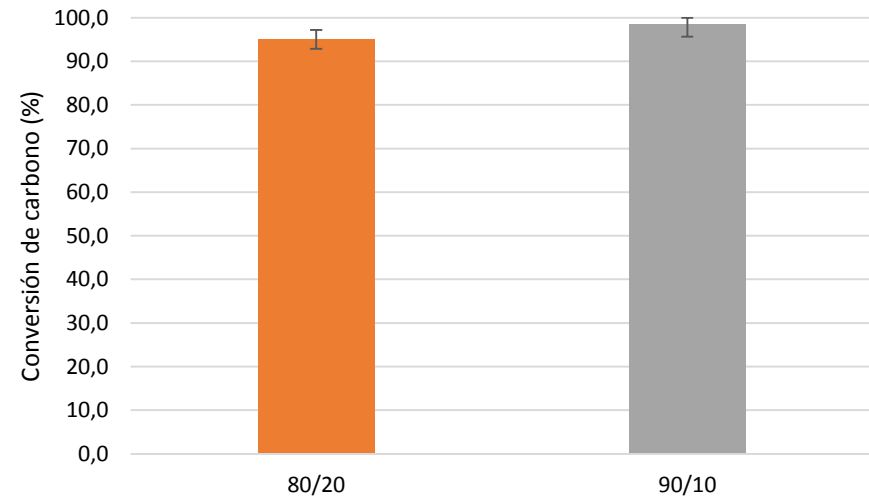


Figura 2.1.6. Conversión de carbono para las corridas en operación térmica con las mezclas 80/20 y 90/10.

2.2. Consideraciones operacionales

- En condición de operación térmica, solo la batería alimenta los sopladores y la instrumentación, se podría colocar una fuente con capacidad nominal de 500 W que típicamente operaría a unos 120 W para poder prolongar la operación térmica del sistema.
- El segundo factor que se debe considerar en operación térmica y en menor medida en operación con generación eléctrica, son los mismos sopladores, ya que no están considerados para operación continua de acuerdo al fabricante

2.2. Consideraciones operacionales

- El tercer factor relacionado con la operación térmica es la extensión de la pirólisis en el reactor. Debido a que el motor no llega a operar, las temperaturas en la sección de pirólisis serán inferiores a los 100°C.
- Reducción de la producción de **metano**, se tienen fracciones volumétricas cercanas al **6%**, mientras que para las corridas con generación eléctrica pueden ser cercanas al **11%**,

2.2. Consideraciones operacionales

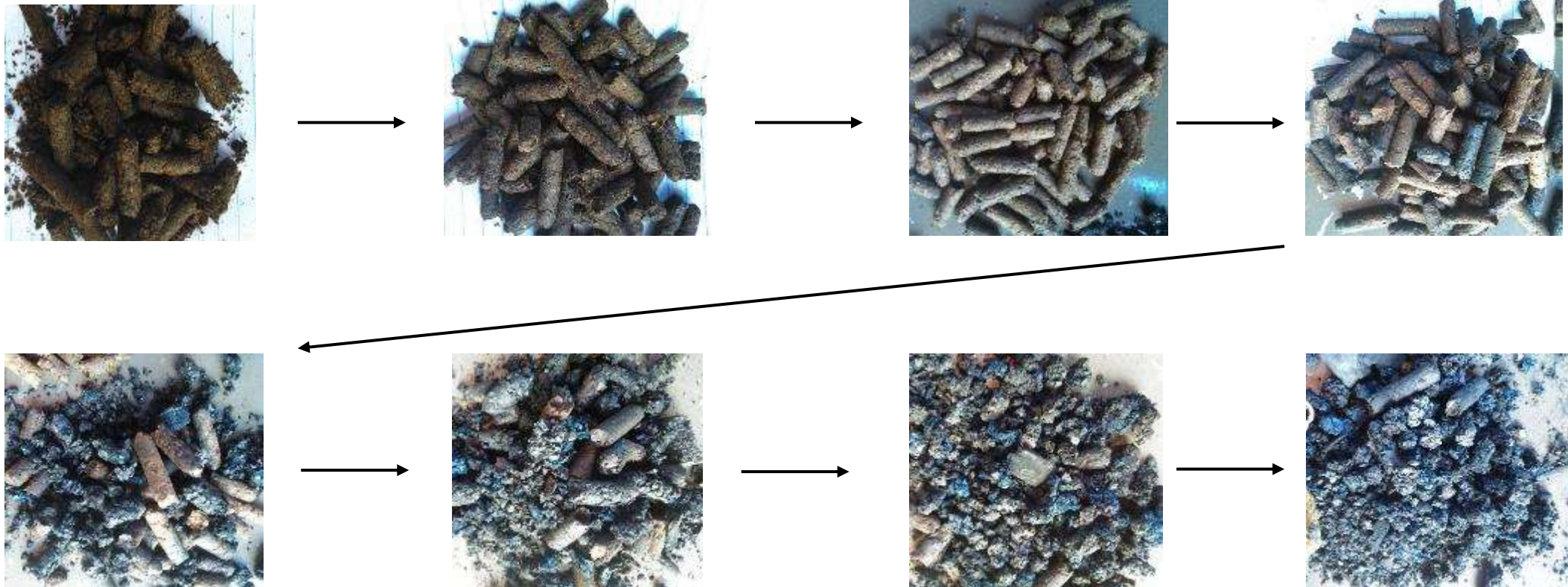


Figura 2.3.1. Ensuciamiento en los sopladores.



Figura 2.3.2. Sopladores limpios.

2.2. Consideraciones operacionales



2. Operación térmica: Ventajas

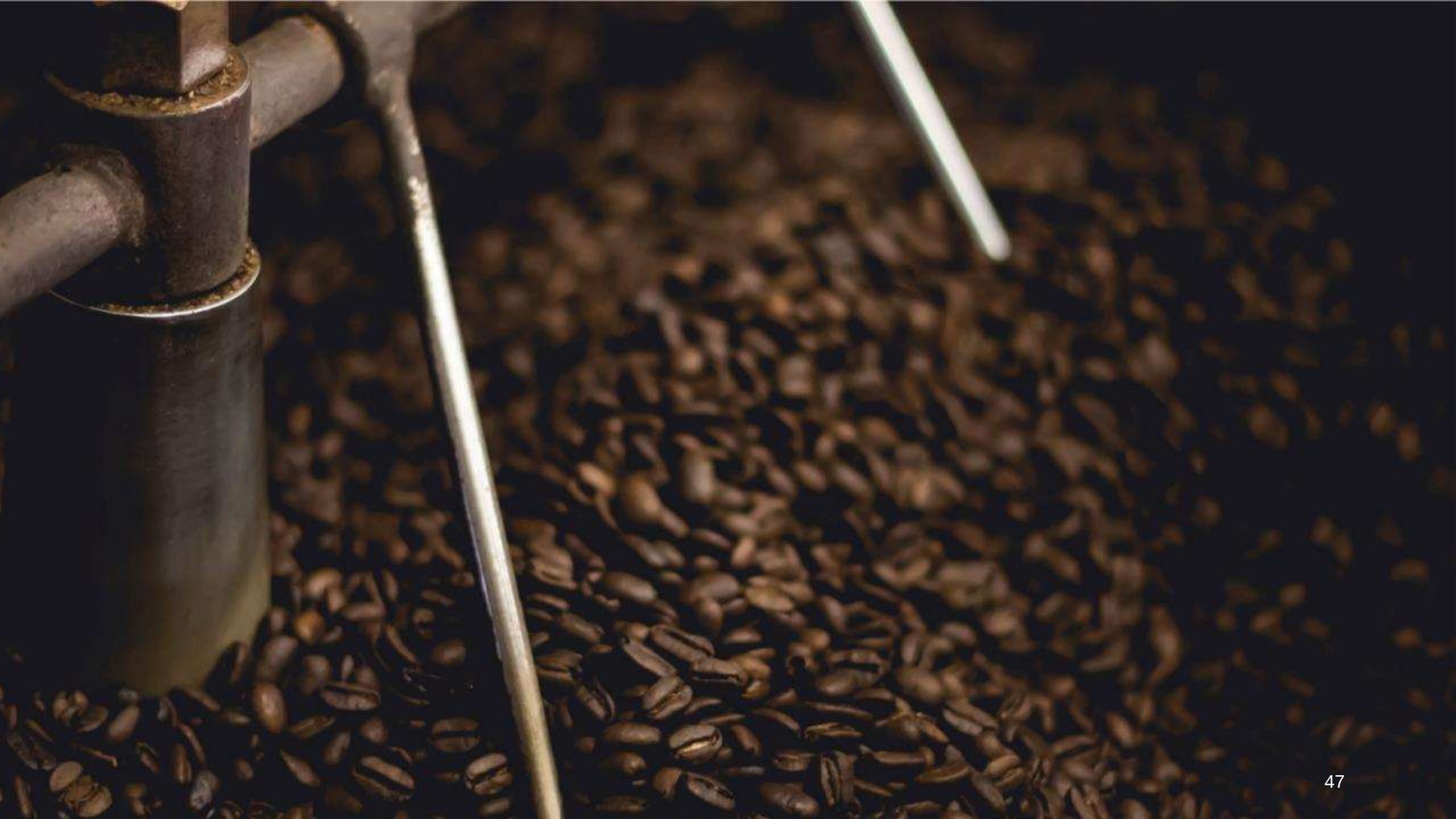
- El sistema utiliza una materia prima que se considera un desecho incómodo (broza) e inherente al proceso de beneficiado.
- El syngas puede producirse contra demanda, lo que hace innecesario el almacenamiento de gases inflamables.
- El syngas puede distribuirse a lo largo de la planta de proceso de forma expedita y fácil de controlar por medio de sistemas de tuberías adecuados para tal efecto.
- La combustión del syngas es más eficiente que la combustión de leña o pellets de biomasa.
- El syngas es un combustible de composición conocida que no deja cenizas luego de la combustión.
- La combustión limpia del syngas resulta en una menor necesidad de mantenimiento de los equipos donde se da la transferencia de calor.
- La tecnología necesaria para el trasiego y combustión de gases es segura, siempre y cuando se cumplan con las regulaciones pertinentes, y bien conocida desde hace décadas.
- El ahorro en leña y el consumo de una biomasa de disponibilidad estacional hacen al proceso atractivo desde la perspectiva de las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Los procesos de combustión directa de biomasa pueden generar otras emisiones no deseadas por la temperatura de combustión y el tipo de biomasa, como lo son dioxinas y furanos, mientras que la temperatura de gasificación es menor y se evita su formación.

2. Operación térmica: Desventajas

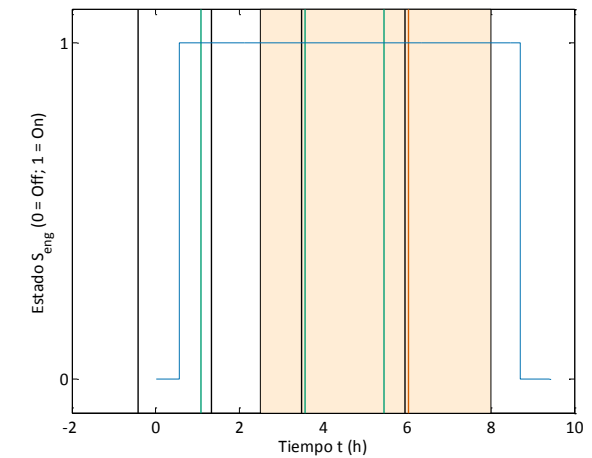
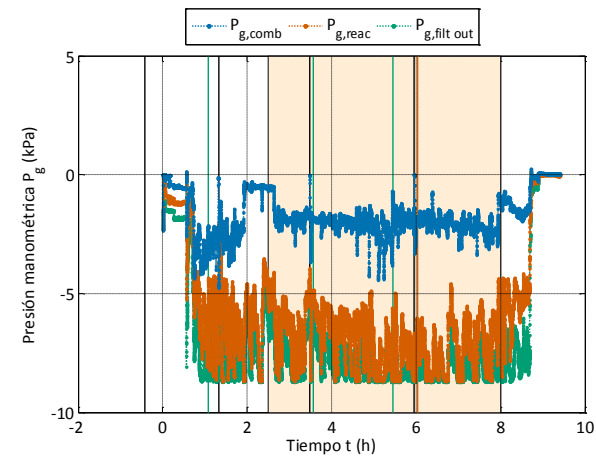
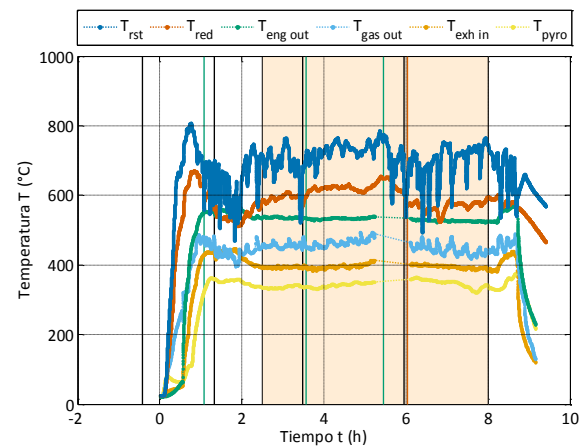
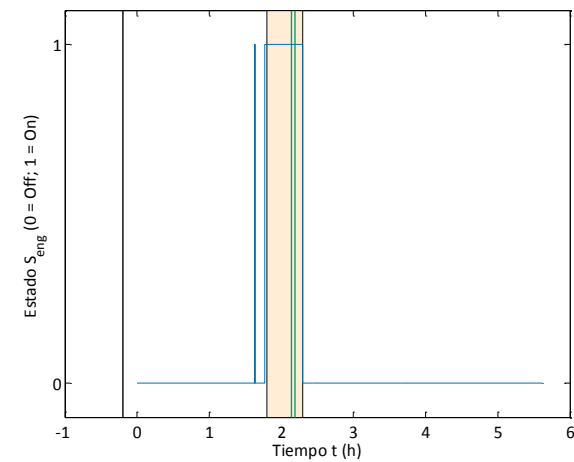
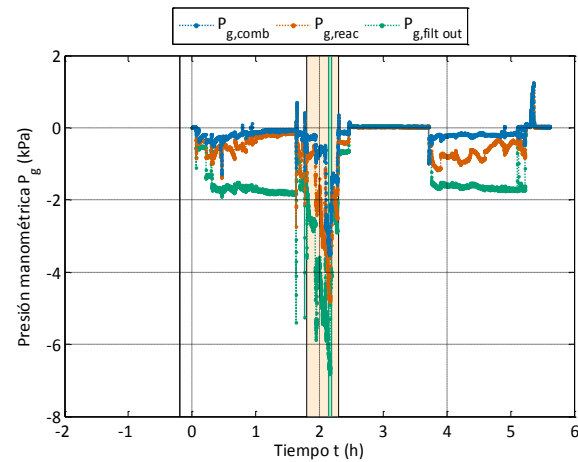
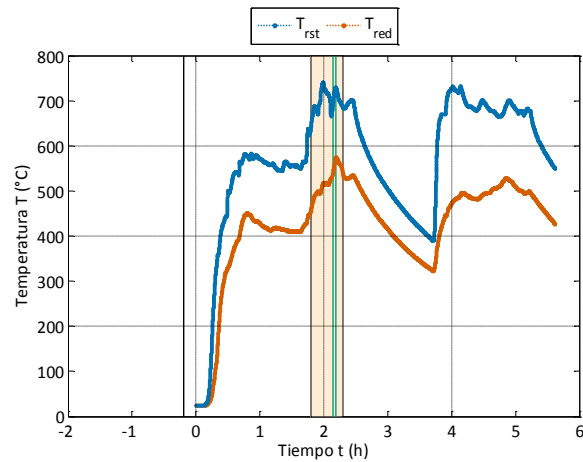
- La necesidad de invertir capital para implementar los procesos de acondicionamiento y gasificación de la biomasa.
- La necesidad de modificar equipos existentes u obtener equipos nuevos para la combustión y trasiego seguro del syngas.
- La necesidad de incurrir en los costos de operación y mantenimiento de los nuevos equipos de proceso.
- Debe haber un periodo de transferencia tecnológica, para la capacitación de quienes trabajen en las nuevas unidades de proceso, así como para lograr una operación confiable, que cumpla con los requerimientos de calidad del proceso global. Es decir, que los pellets producidos tengan las características necesarias para la gasificación, de forma consistente en el tiempo y que a su vez el syngas producido cumpla con los requerimientos de composición y volumen, requeridos por el sistema de distribución y los equipos donde se utilizará finalmente, sin riesgo de interrupción del suministro.

2.3. Conclusiones y recomendaciones

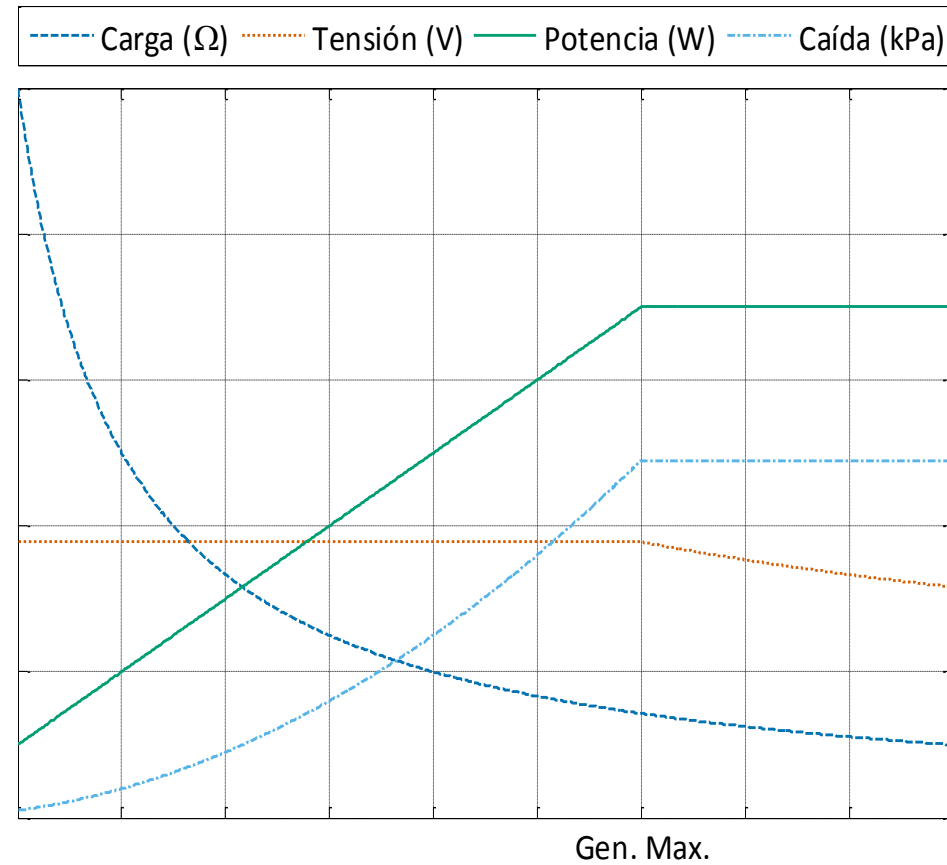
- En cuanto a composición de syngas, no hay diferencia significativa entre los niveles de mezcla de broza y cascarilla, considerando un nivel de significancia de 0,95.
- Es necesario crear líneas estratégicas de suministros de ciertos materiales con importadores directos.
- La producción y calidad de syngas gas se ve afectada por la operación térmica, ya que el flujo decae con respecto a los rendimientos observados cuando opera el motor y la pirólisis no se lleva a cabo adecuadamente.



3. Modificaciones al sistema



3.1. Deficiencias en el diseño original ante la operación con pellets de broza



3.1. Deficiencias en el diseño original ante la operación con pellets de broza



Figura 3.2.2. Comparación del ensuciamiento típico del gobernador al operar con chips de madera (izquierda) y pellets de broza (derecha).

3.1. Deficiencias en el diseño original ante la operación con pellets de broza

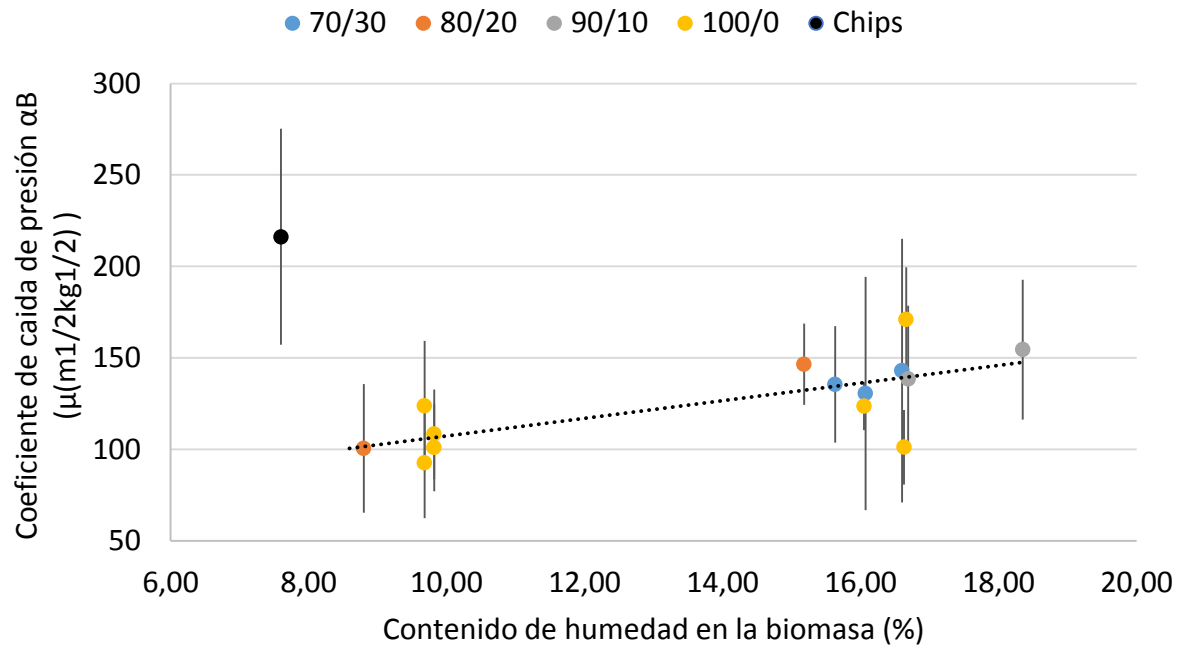


Figura 4.3.8. Efecto de la mezcla broza/cascarilla y el porcentaje de humedad de la biomasa sobre el coeficiente de caída de presión del lecho del reactor α_B durante la operación con generación eléctrica.

3.2. Sistema de limpieza

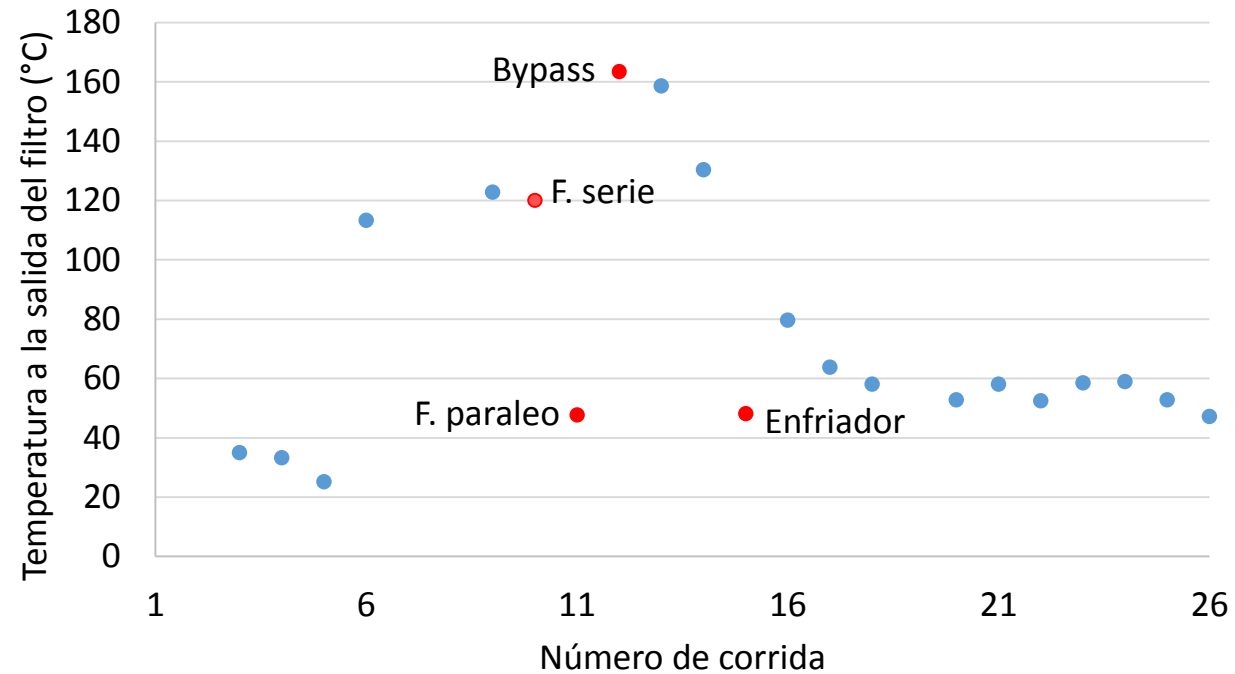


Figura 3.3.1. Cronología de las modificaciones al sistema y su efecto sobre la temperatura de salida del sistema de filtrado.

3.2.1. Filtros

Figura 3.3.3 Instalación del sistema de filtrado en paralelo.



3.2.1. Filtros

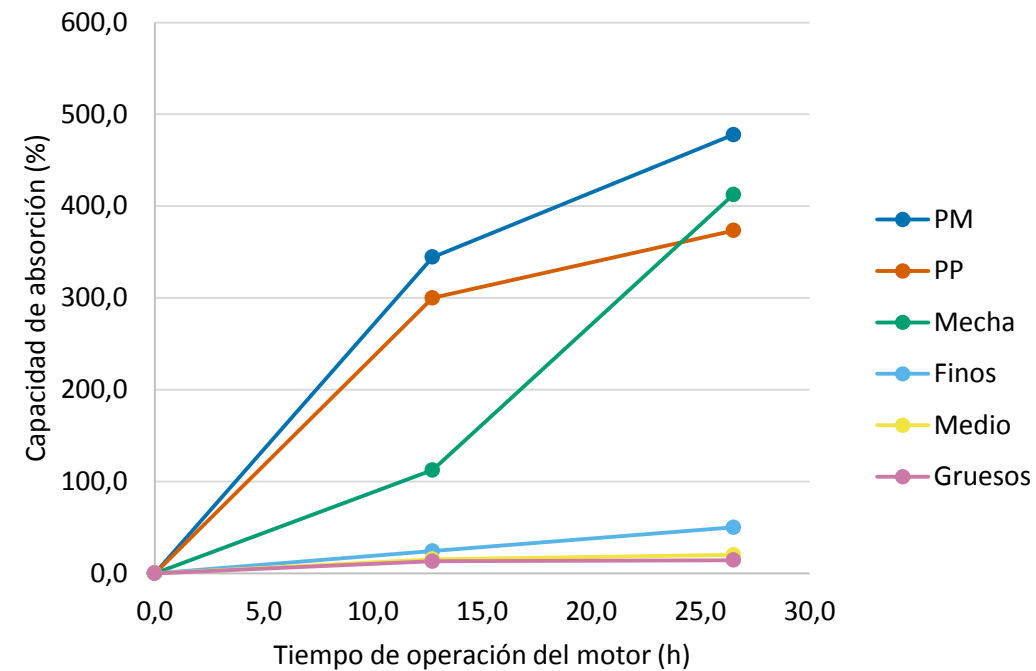


Figura 3.3.12. Capacidad de absorción de los diferentes materiales de relleno de los filtro en función del tiempo (PM = musgo de turbera), (PP = pilopropileno).

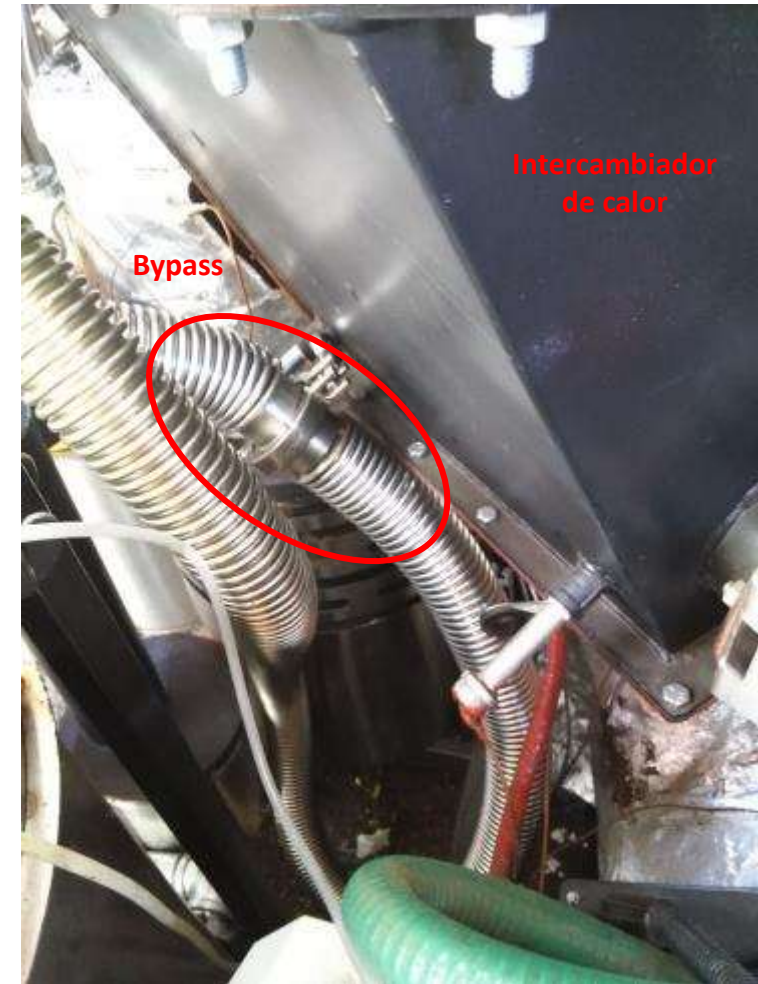
3.2.2. “Bypass” y Enfriador



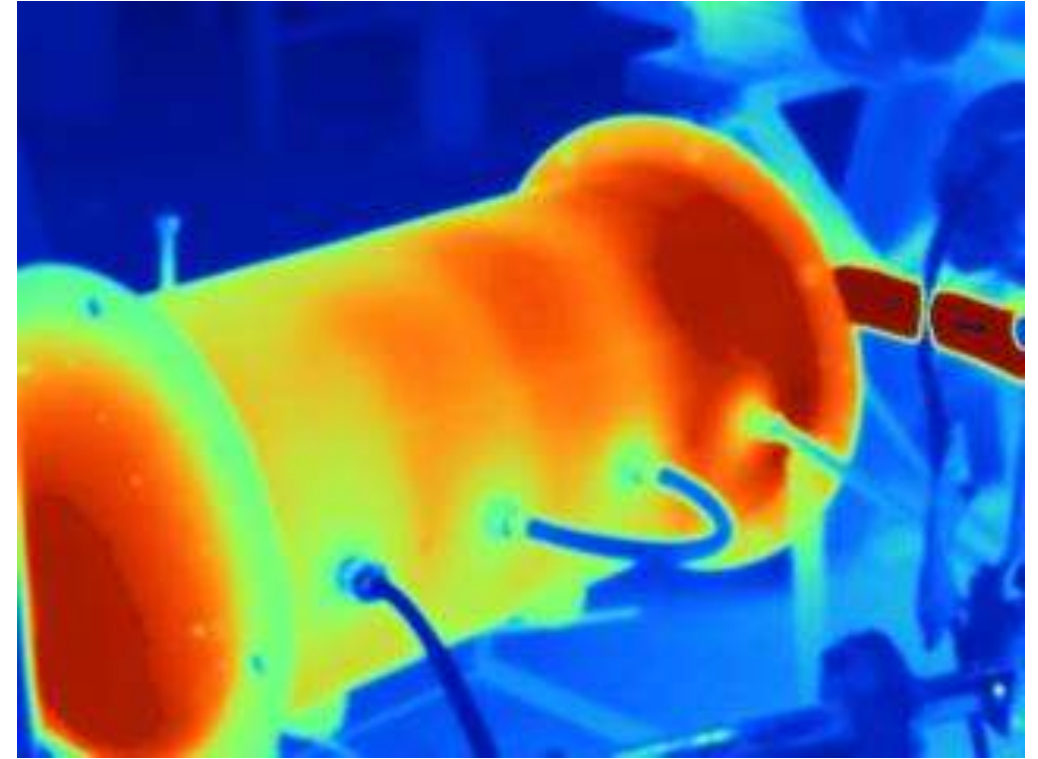
Figura 3.3.15. Detalle de la obstrucción del intercambiador de calor de la cámara de presecado.

3.2.2. “Bypass” y Enfriador

Figura 3.3.16. Implementación de bypass del intercambiador de calor de la cámara de presecado.



3. Modificaciones al sistema: Enfriador



Intercambiador de calor instalado y perfil IR

Limpieza del enfriador



3.2.2. “Bypass” y Enfriador

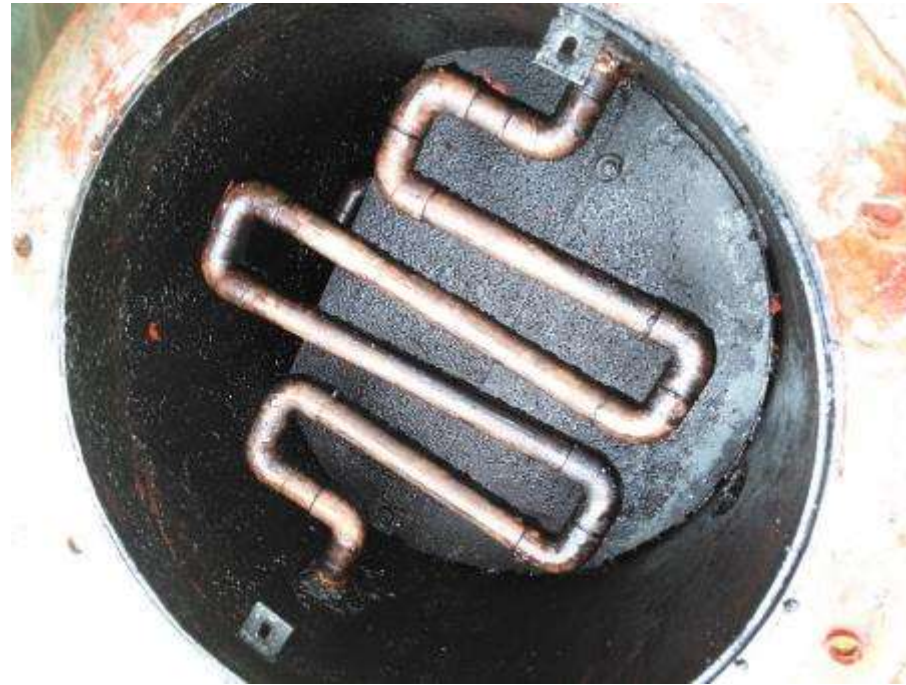


Figura 3.3.21. Superficie de intercambio de calor limpia y mamparas en su configuración final.

3.3. Consideraciones operacionales

Cuadro 3.4.2. Efecto de la asimetría del sistema de filtrado en la capacidad de absorción luego de 26,5 horas de operación del motor.

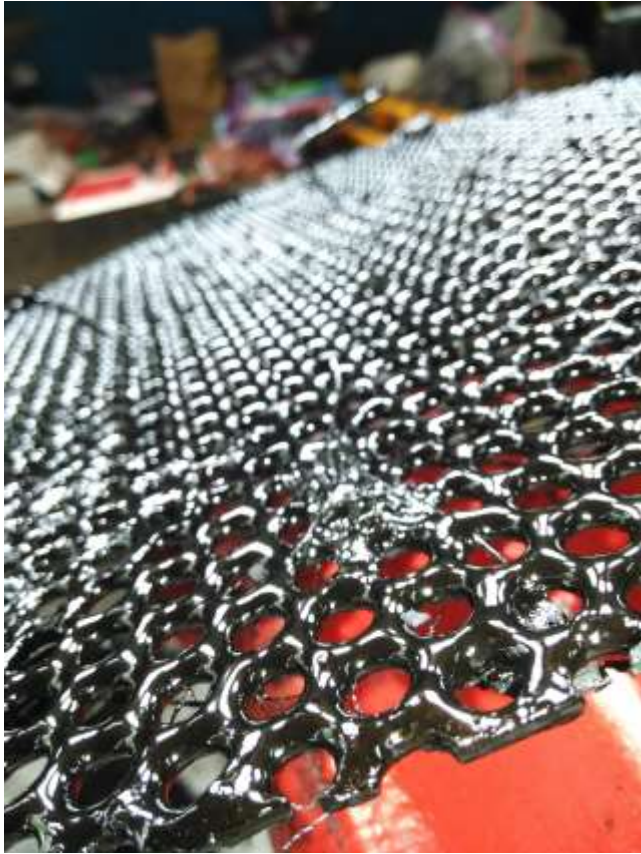
Estrato	Material	Capacidad de absorción del filtro #1 (%)	Capacidad de absorción del filtro #2 (%)
1	Tapetes de polipropileno	300,0	260,0
2	Espuma de polipropileno	393,3	353,3
3	Mecha de algodón #1	300,0	300,0
4	Musgo de turbera	477,8	477,8
5	Mecha de algodón #2	650,0	400,0
6	Madera y carbón finos	55,0	45,0
7	Madera y carbón medios	21,3	18,8
8	Madera y carbón gruesos	12,5	16,3

3.3. Consideraciones operacionales



Figura 3.4.2. Canales de flujo en el musgo de turbera.

Relleno de los filtros



Carbón y chips gruesos



Capacidad de absorción: 16,3%



Carbón y chips medianos



Capacidad de absorción: 21,3%



Carbón y chips finos

Capacidad de absorción: 55,0%



Mecha de mecánico

Capacidad de absorción: 300,0%



Calcetas

Capacidad de absorción: 393,3%



Tapetes

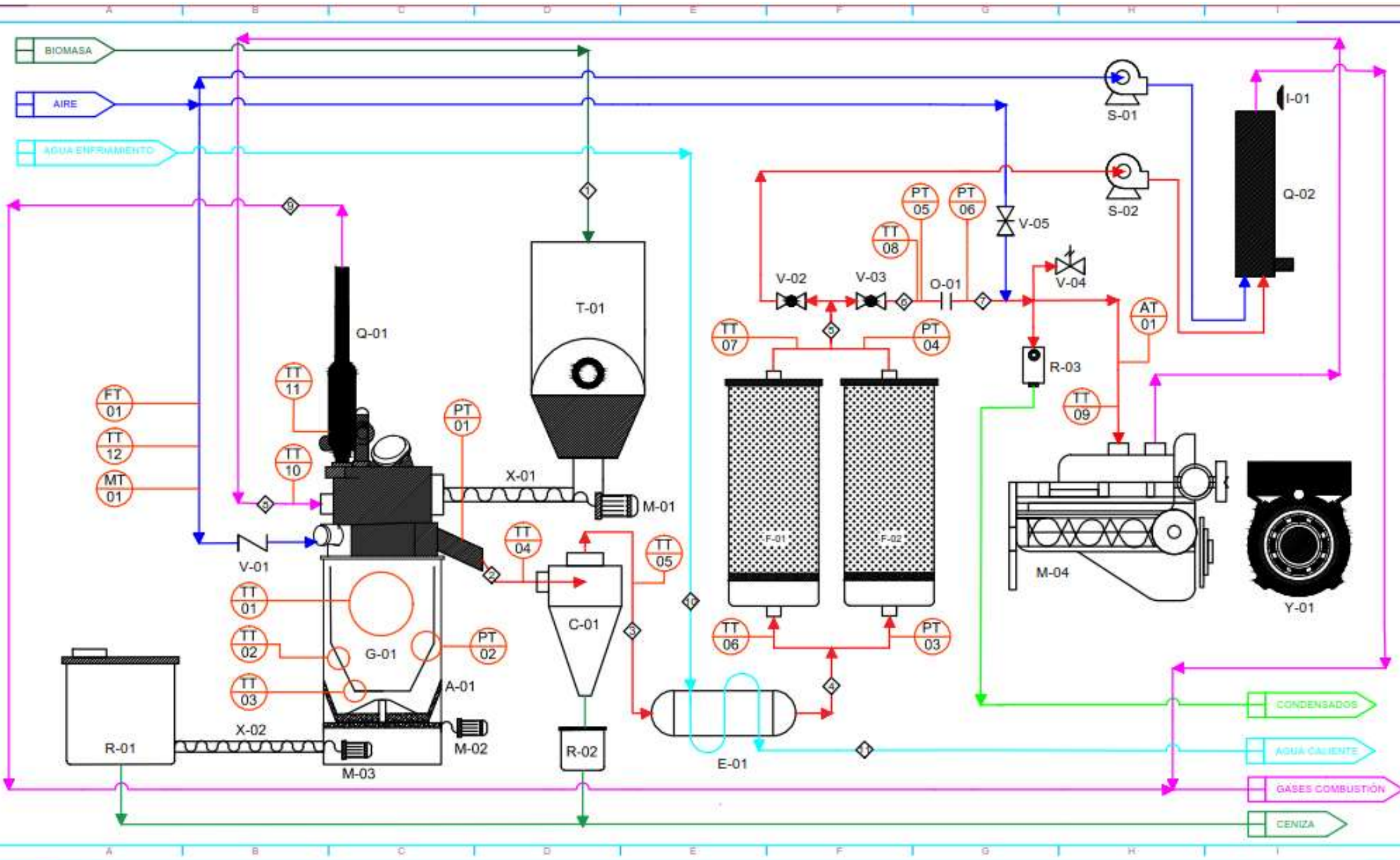
Capacidad de absorción: 300,0%



3.4. Conclusiones y recomendaciones



4. Operación con generación eléctrica



NOMENCLATURA	
IDEN	DESCRIPCIÓN
A-01	Agitador de ceniza
C-01	Ciclón
E-01	Enfriador
F-01	Filtro de gas síntesis
F-02	Filtro de gas síntesis
G-01	Reactor
I-01	Ignidor
M-01	Motor tornillo alimentación
M-02	Motor del agitador de ceniza
M-03	Motor tornillo cenizas
M-04	Motor generador
R-01	Recolector de cenizas
R-02	Recolector de cenizas
R-03	Recolector de condensados
S-01	Soplador de aire
S-02	Soplador de gas síntesis
T-01	Tolva
V-01	Válvula check para aire
V-02	Válvula de bola
V-03	Válvula de bola
V-04	Válvula de alivio
V-05	Válvula mariposa de control
Q-01	Medidor de flujo tipo orificio
Q-02	Mufa para salida de gases
Q-03	Quemador gases combustión
X-01	Tornillo sinfín
X-02	Tornillo sinfín
Y-01	Generador

4.1. Caracterización del sistema en operación con generación eléctrica

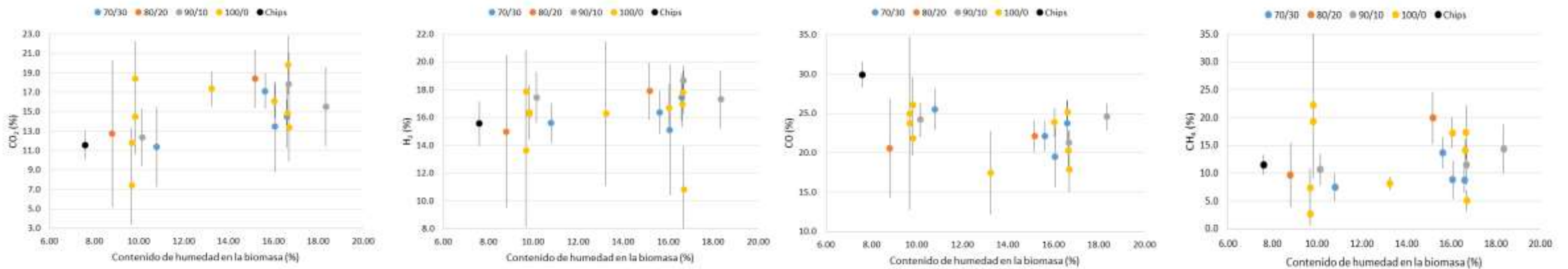


Figura 4.3.1. Efecto de la mezcla broza/cascarilla y el porcentaje de humedad de la biomasa sobre la composición del syngas producido para generación eléctrica.

4.1. Caracterización del sistema en operación con generación eléctrica

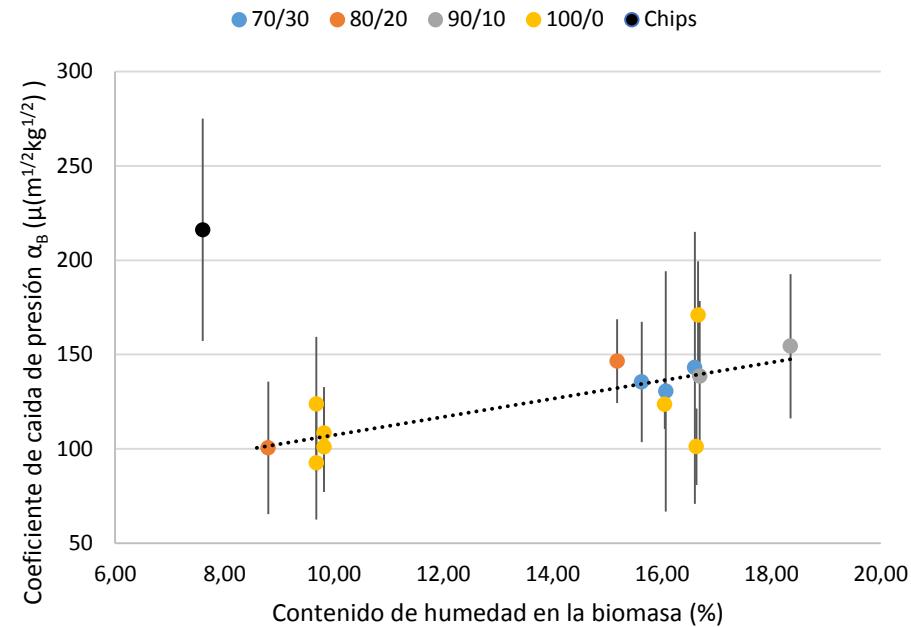


Figura 4.3.8. Efecto de la mezcla broza/cascarilla y el porcentaje de humedad de la biomasa sobre el coeficiente de caída de presión del lecho del reactor α_B durante la operación con generación eléctrica.

4.2. Balances de masa

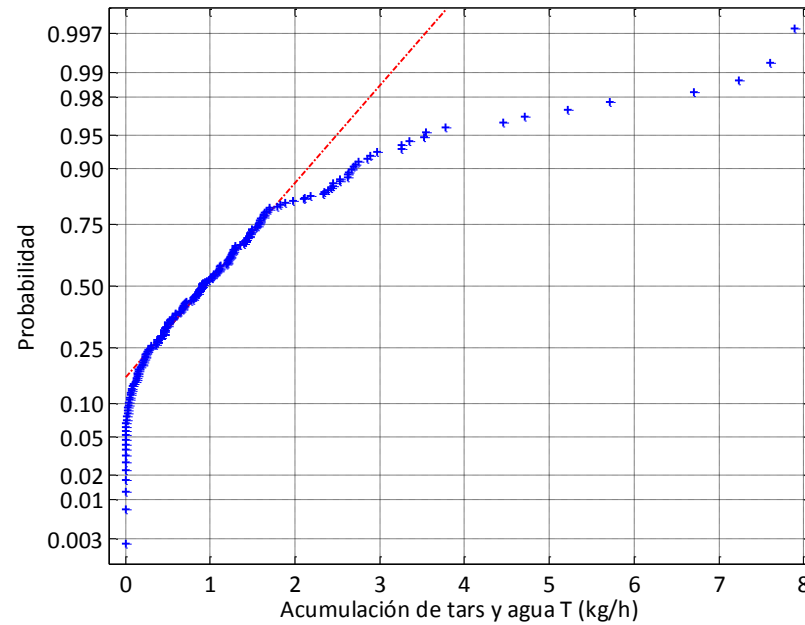


Figura 4.2.1. Gráfico de probabilidad normal de la estimación de la tasa de acumulación de alquitranes y agua en el sistema de limpieza del syngas de la corrida 26.

Valores promedio y desviación estándar de los indicadores de desempeño de la gasificación durante la operación con generación eléctrica.

	Broza de café
Rendimiento de syngas SY (Nm ³ /kg)	1,45
Des. Std. Rendimiento de syngas (Nm ³ /kg)	0,12
Razón equivalente ER (adim.)	3,43
Des. Std. Razón equivalente (adim.)	0,47
Eficiencia del gas frío CGE (%)	81,7
Des. Std. Eficiencia del gas frío (%)	10,4
Conversión de carbono CC (%)	91,9
Des. Std. Conversión de carbono (%)	1,14
Rendimiento eléctrico (kWh/kg)	0,46
Des. Std. Rendimiento eléctrico (kWh/kg)	0,06
Eficiencia térmica global del sistema TGE (%)	10,2
Des. Std. Eficiencia térmica global del sistema (%)	1,5

4.3. Correlaciones estadísticas

Cuadro 4.4.1. Coeficientes de correlación para el conjunto de variables de interés del sistema de gasificación y generación utilizado.

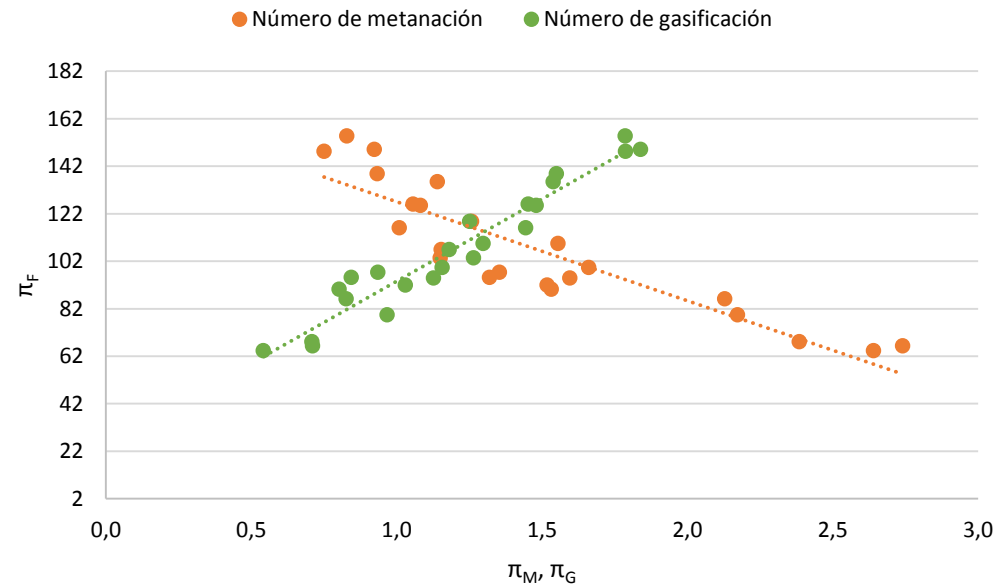
$\dot{M}_{BM}$ (kg/h)	1,00	0,96	0,57	0,79	0,35	0,85	-0,83	0,28	0,68	0,46	0,22
$\dot{M}_{syn}$ (kg/h)	1,00	0,51	0,74	0,39	0,80	-0,84	0,23	0,50	0,42	0,20	
CH_4 (% Vol. Frac)	1,00	0,76	0,06	0,39	-0,58	0,45	0,79	0,98	0,75		
CO_2 (% Vol. Frac)	1,00	0,26	0,55	-0,70	0,41	0,63	0,66	0,38			
T_{red} (°C)	1,00	0,71	-0,52	-0,81	0,05	-0,03	-0,02				
T_{gas} (°C)	1,00	-0,89	-0,15	0,55	0,32	0,31					
P_{filt} (kPa)	1,00	-0,23	-0,57	-0,50	-0,44						
W (W)	1,00	0,32	0,49	0,57							
ϕ (Adim.)	1,00	0,73	0,55								
LHV_{syn} (MJ/Nm ³)	1,00	0,85									
v (Nm ³ /kg)	1,00										

4.3. Correlaciones estadísticas

Cuadro 4.4.2. Coeficientes de correlación para el conjunto de variables adimensionales características del sistema de gasificación y generación utilizado.

ϕ (Adim.)	1,00	-0,82	-0,65	0,63	0,74	-0,64	-0,22
π_W (Adim.)	1,00	0,84	-0,27	-0,43	0,41	-0,04	
π_T (Adim.)	1,00	-0,41	-0,47	0,34	-0,33		
π_G (Adim.)	1,00	0,97	-0,85	-0,27			
π_F (Adim.)	1,00	-0,90	-0,29				
π_M (Adim.)	1,00	0,08					
π_P (Adim.)	1,00						

4.3. Correlaciones estadísticas



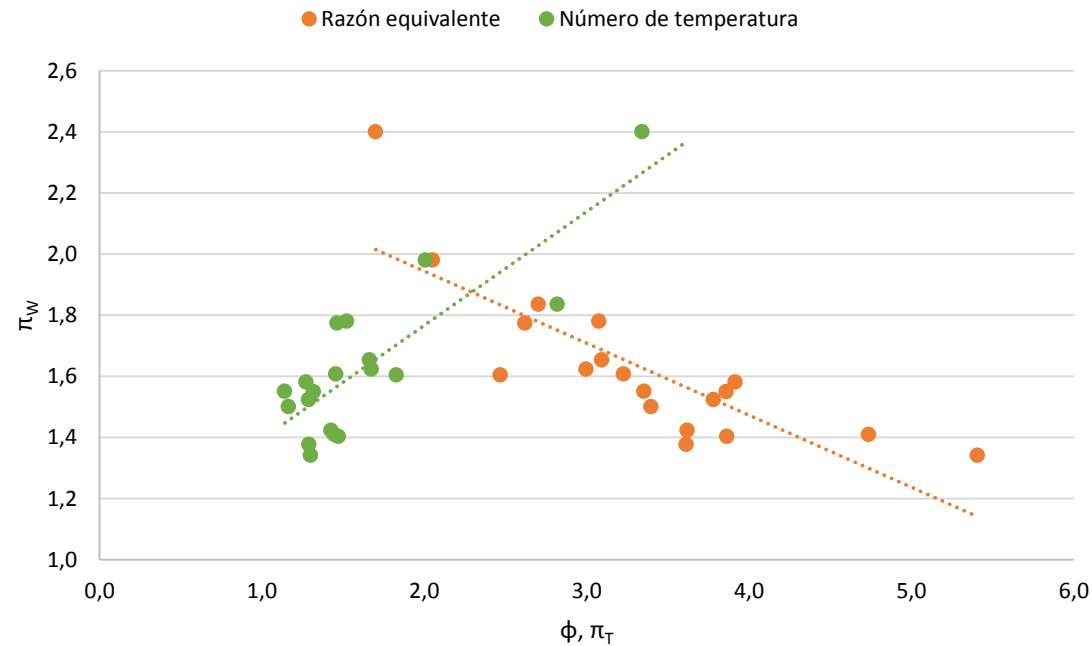
$$\pi_F = -41,655 \cdot \pi_M + 168,34$$
$$R = -0,90$$

(4.4.7)

$$\pi_F = 69,263 \cdot \pi_G + 24,24$$
$$R = 0,97$$

(4.4.8)

4.3. Correlaciones estadísticas



$$\pi_W = -0,2358 \cdot \phi + 2,416$$
$$R = -0,82$$

(4.4.9)

$$\pi_W = 0,3724 \cdot \pi_T + 1,023$$
$$R = 0,84$$

(4.4.10)

4.5. Consideraciones operacionales



Figura 4.5.1. Interfaz del equipo con lecturas de presión fuera de rango.

Ventajas

- El syngas puede producirse contra *demanda*, lo que hace innecesario el almacenamiento de gases inflamables.
- El syngas *puede distribuirse* a lo largo de la planta de proceso de forma expedita y fácil de controlar por medio de sistemas de tuberías adecuados para tal efecto.
- El syngas es un combustible de composición conocida que *no deja cenizas luego de la combustión*. Resulta en una menor necesidad de mantenimiento de los equipos donde se da la transferencia de calor.
- La combustión del syngas es *más eficiente que la combustión de leña o pellets de biomasa*. El ahorro en leña y el consumo de una biomasa de disponibilidad estacional hacen al proceso atractivo desde la perspectiva de las emisiones de gases de efecto invernadero.

2. Operación térmica: Desventajas

- La necesidad de invertir capital para implementar los y gasificación de la biomasa. **procesos de acondicionamiento** (la combustión y **trasiego seguro** del syngas).
- La necesidad de incurrir en los **costos de operación y mantenimiento** de los nuevos equipos de proceso.
- Debe haber un periodo de transferencia tecnológica, para la capacitación de quienes trabajen en las nuevas unidades de proceso, así como para lograr una operación confiable, que cumpla con los **requerimientos de calidad del proceso** global. Es decir, que los pellets producidos tengan las características necesarias para la gasificación, de forma consistente en el tiempo y que a su vez el syngas producido cumpla con los requerimientos de composición y volumen, requeridos por el sistema de distribución y los equipos donde se utilizará finalmente, sin riesgo de interrupción del suministro.

CONCLUSIONES GENERALES

- **Sí es factible técnicamente** gasificar broza de café.
- Según los resultados de la caracterización, se clasificó como **especie herbácea** la broza de café.
- El muestreo y los métodos analíticos de la broza **son determinantes** para el pronóstico y análisis del proceso de gasificación.
- Se podría utilizar pellets **100% broza**. La **selección del lote** de RAO es vital para asegurar la Buena operación (temporalidad e impurezas)
- El **secado** es un factor determinante para la **densificación** apropiada de la broza.
- El **syngas** obtenido presenta una composición y caracterización competente en comparación a otras materias primas.
- El módulo commercial utilizado se tuvo que modificar en el **sistema de limpieza** sin comprometer su funcionalidad. Esto afectará matriz de costos.
- Los **parámetros de desempeño** de la tecnología utilizada son similares a los declarados en referencias.
- Se observa un **alto potencial de aprovechamiento** de grandes volúmenes de broza solo aplicando prensado y secado termo-PV solar, en un reactor fluidizado.



We are grateful for the technical collaboration of J. A. Castillo, D. Molina, J. Benavides, M. Chaves, J. Morice, C. Gomez, P. Mora, A. Ramirez, M. Sibaja, E. Solorzano, R. Chacon, E. Montero.