



EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE MEJORA AL APORTE
ENERGÉTICO DEL BIODIGESTOR DE MEZCLA COMPLETA
PARA EL PROCESO PRODUCTIVO DEL HONGO
“PLEUROTUS OSTREATUS” VAR. “FLORINDA GIRGOLAS” EN
LA COLONIA Y GRANJA PENAL GUSTAVO ANDRÉ EN
LAVALLE-MENDOZA

Nombre y Apellido: Emanuel Alejandro Fernández Sánchez

Para optar al título de INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

Facultad de Ciencias Agrarias - Universidad Nacional de Cuyo

Mendoza, Argentina de abril de 2023



*EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE MEJORA AL APORTE
ENERGÉTICO DEL BIODIGESTOR DE MEZCLA COMPLETA
PARA EL PROCESO PRODUCTIVO DEL HONGO
“PLEUROTUS OSTREATUS” VAR. “FLORINDA GIRGOLAS” EN
LA COLONIA Y GRANJA PENAL GUSTAVO ANDRÉ EN
LAVALLE-MENDOZA*

Emanuel Alejandro Fernández Sánchez

Contacto: fernandeemanuel1997@gmail.com

Director: Ing. RNR. Martín Alejandro Reynoso

Codirector: Ing. RNR. José Nicolás Martín

Comisión Evaluadora:

- Dra. Ing. Agr. Quiroga Noelia
- Mgs. Ing. Agr. Indiveri Elisa
- Ing. Ravelli Ariel

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a Dios por ser mi guía en este camino y proceso a lo largo de mi vida y formación.

A mis padres (Silvana y Alejandro) y hermanos/as (Adriel, Marianela y Aldana) por ser mi sostén y apoyarme en mi crecimiento y formación. Además, por inculcarme valores del esfuerzo, estudio y trabajo; sin los cuales no podría haber alcanzado este maravilloso logro.

Quiero hacer mención especial a mi novia (Guadalupe) por su incondicional amor, apoyo y motivación en este arduo camino.

A mis dos directores de Tesis Martín y Nicolás por todo su aporte de experiencia y conocimiento. También, por haberme guiado en que este proyecto saliera adelante de la forma más profesional posible.

A amigos, colegas y compañeros de trabajo amigos que me acompañaron y me acompañan en los diferentes momentos y objetivos de mi vida. Que además me motivan a ser una mejor persona y profesional día a día.

Agradecer la posibilidad de estudiar en una Universidad Pública y de calidad. También a esta bella Facultad de la que me despido con maravillosos recuerdos transitados en la carrera.

A todos/as muchas gracias.

.

RESUMEN

En el "Aula Satélite Unidad N°4 - Colonia y Granja Penal - Juan Bautista Vitale Nocera" ubicado en localidad de Gustavo André del departamento Lavalle de la provincia de Mendoza, se alojan aproximadamente 90 personas privadas de su libertad (PPL). Esta granja penal se destaca por su producción caprina y ovina, así como por el cultivo de hongos girgolas, entre otras actividades. Todo esto enfocado en la búsqueda de la reinserción social y laboral de dichas PPL.

El cultivo del hongo Girgola se realiza en un invernadero utilizando virutas de álamo como sustrato. Este proceso consta de diferentes etapas, siendo la más relevante la pasteurización. Durante esta etapa se utiliza vapor, proveniente de una caldera, sin aislamiento, alimentada con Gas Licuado de Petróleo (GLP), para desinfectar el sustrato a una temperatura controlada entre 70°C y 80°C durante 2 horas. La pasteurización en el penal requiere una demanda energética de 70.714 kcal por pasteurización, equivalente a 13,58 Nm³ de biogás.

La granja produce alrededor de 146.000 kg de estiércol al año de cabras y ovejas, con un potencial energético anual de 597.247,35 MJ. Este material tiene el potencial para ser aprovechado en la producción biogás en el biodigestor instalado en la granja y utilizarse como fuente de energía para la caldera. No obstante, solo sería posible aprovechar el 2% de esa masa de estiércol para generar biogás, debido a que la principal limitante, es la capacidad total de 2,75 m³ que tiene el biodigestor.

Mediante cálculos y simulación, utilizando el programa SIMUSOL, se realizan diferentes propuestas para incrementar la eficiencia energética de la caldera y el biodigestor, utilizando aislamiento y calefacción. De todo esto se desprende que resulta apropiado, desde un punto de vista técnico y económico, colocar aislante a la superficie exterior de la caldera, lana de vidrio de 2,5 cm de espesor y reducir en un 90% las pérdidas energéticas.

Para el biodigestor la opción más viable desde el punto de vista técnico y económico es colocar un aislamiento de poliestireno expandido (EPS) de 10 cm de espesor y utilizar calefacción por resistencia eléctrica. Esto garantiza generar la máxima producción diaria de 0,429 Nm³ de biogás/día a una temperatura constante de operación de 25°C y poder cubrir hasta el 23% de la demanda energética de la caldera aislada durante la pasteurización, representando un ahorro anual total de 107,84 dólares.

En términos de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), la caldera sin aislante utiliza completamente GLP emite alrededor de 970,84 kg de CO_{2eq} / año. En cambio, si utiliza el 23% de biogás como fuente de energía en la caldera aislada, las emisiones anuales se reducirían a un total de 719.01 kg CO_{2eq}/año.

Con este proyecto entonces se hace aprovechamiento del biogás como fuente de energía renovable en un proceso productivo, a partir de desechos orgánicos propios de lugar. Se produce un ahorro energético por las propuestas de aislamiento y se genera una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Todas estas medidas en definitiva promueven un proceso productivo sostenible en la granja Penal.

Palabras Claves: Biogás, Eficiencia Energética, Aislamiento, Calefacción.

SUMMARY

In the "Satellite Classroom Unit No. 4 - Colonia and Granja Penal - Juan Bautista Vítale Nocera" located in the town of Gustavo André in the Lavalle department of Mendoza province, approximately 90 individuals deprived of their liberty (PPL) are housed. This penal farm is known for its goat and sheep production, as well as the cultivation of oyster mushrooms, among other activities. All of this is focused on the reintegration of these PPL into social and labor contexts.

The cultivation of the Oyster mushroom is carried out in a greenhouse using poplar shavings as a substrate. This process involves various stages, with pasteurization being the most significant. During this stage, steam from an uninsulated boiler fueled by Liquefied Petroleum Gas (LPG) is used to disinfect the substrate at a controlled temperature between 70°C and 80°C for 2 hours. Pasteurization in the penal institution requires an energy demand of 70,714 kcal per pasteurization, equivalent to 13.58 Nm³ of biogas.

The farm produces around 146,000 kg of goat and sheep manure annually, with an annual energy potential of 597,247.35 MJ. This material has the potential to be utilized in biogas production in the biodigester installed on the farm and used as a source of energy for the boiler. However, only 2% of this mass of manure could be utilized for biogas generation, due to the primary limitation being the total capacity of 2.75 m³ of the biodigester.

Through calculations and simulations using the SIMUSOL program, different proposals are made to increase the energy efficiency of the boiler and the biodigester, using insulation and heating. From all of this, it is evident that it is appropriate, from both a technical and economic standpoint, to apply insulation to the external surface of the boiler - specifically, 2.5 cm thick glass wool insulation - and reduce energy losses by 90%.

For the biodigester, the most viable option from both a technical and economic perspective is to apply 10 cm thick expanded polystyrene (EPS) insulation and use electric resistance heating. This ensures the generation of the maximum daily production of 0.429 Nm³ of biogas/day at a constant operating temperature of 25°C, and the ability to cover up to 23% of the energy demand of the insulated boiler during pasteurization, resulting in a total annual savings of \$107.84.

In terms of Greenhouse Gas (GHG) emissions, if the boiler uses only GLP, it emits around 970.84 kg of CO_{2eq}/year. However, if 23% of biogas is used as an energy source in the insulated boiler, annual emissions would be reduced to a total of 719.01 kg CO_{2eq}/year.

With this project, the utilization of biogas as a renewable energy source is harnessed within a productive process, utilizing organic waste inherent to the location. Energy savings are achieved through insulation proposals, along with a reduction in Greenhouse Gas (GHG) emissions. Ultimately, all of these measures promote a sustainable production process within the penal farm.

Keywords: *Biogas, Energy Efficiency, Insulation, Heating.*

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO	1
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN EN LA COLONIA Y GRANJA DEL PENAL.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.3 ANTECEDENTES	5
1.4 HONGOS.....	6
1.4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS HONGOS.....	6
1.4.2 HONGOS COMESTIBLES.....	7
1.4.3 HISTORIA, ESTADO ACTUAL Y TENDENCIA DE LA PRODUCCIÓN DE LOS HONGOS COMESTIBLES EN EL MUNDO Y EN ARGENTINA.....	8
1.4.4 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL FÍLUM BASIDIOMYCOTA.....	9
1.4.5 CULTIVO DE PLEUROTUS OSTREATUS.....	10
1.4.6 ETAPAS DEL CULTIVO DE HONGOS PLEUROTUS.....	12
1.5 ENERGÍA.....	14
1.5.1 TRASFERENCIA DE CALOR.....	14
Conducción.....	14
Convección.....	16
Radiación.....	17
1.5.2 ENERGÍAS CONVENCIONALES Y ENERGÍAS RENOVABLES.....	18
1.6 BIOGÁS	19
1.6.1 DIGESTIÓN ANAERÓBICA.....	19
1.6.2 ETAPAS DE LA BIODIGESTIÓN.....	20
1.6.3 FACTORES Y PARAMETROS FISICO-QUIMICOS DE LA BIODIGESTION.....	21
Tipo de sustrato.....	21
Sólidos Totales (ST) y volátiles (SV).....	23
Relación carbono/ nitrógeno (C/N).....	24
Codigestión.....	24
Temperatura.....	24
PH.....	26
Inhibidores y promotores.....	28
Agitación o mezclado.....	29
Tiempo de retención hidráulica.....	29
1.6.4 TIPOS DE SISTEMAS DE BIODIGESTIÓN.....	29
Frecuencia de carga.....	30
Tipo de Mezcla.....	32
Manejo bioquímico.....	33
1.6.5 CONTENIDO ENERGÉTICO Y FACTOR DE EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) DEL BIOGÁS.....	33
1.6.6 EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE BIOGÁS EN ARGENTINA.....	34
1.6.7 LEGISLACION Y NORMATIVAS EN ARGENTINA PARA EL BIOGÁS.....	37
2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....	38
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	38
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	38
2.3 METODOLOGÍA.....	38
2.3.1 ESTUDIOS DE ANTECEDENTES Y BIBLIOGRAFÍA.....	38

2.3.2 CÁLCULO DE LOS RESIDUOS AGROPECUARIOS	39
2.3.3 DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DEL PROCESO DE PASTEURIZACIÓN	40
2.3.4 CÁLCULO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DEL BIODIGESTOR DEL PENAL.....	41
2.3.5 PROPUESTAS DE MEJORA	42
SIMUSOL.....	42
Propuesta de Mejora Caldera.....	43
Propuesta de Mejora al Biodigestor	44
3. SITUACIÓN EN LA GRANJA PENAL DE GUSTAVO ANDRÉ	45
3.1 SITUACIÓN ACTUAL DEL INVERNADERO DEL PENAL	45
3.2 DESCRIPCIÓN DE LA PREPARACIÓN Y PASTEURIZACIÓN DEL SUSTRATO PROCESO PRODUCTIVO QUE SE REALIZA EN EL PENAL	48
3.3 DIAGNÓSTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL EN EL PENAL (CARACTERÍSTICAS, COMPOSICIÓN, PERIODOS Y FRECUENCIA DE GENERACIÓN, ETC.).....	50
3.4 BIODIGESTOR INSTALADO EN EL PENAL DE GUSTAVO ANDRÉ	50
3.5 DATOS CLIMÁTICOS DE GUSTAVO ANDRÉ	52
4. BALANCE DE MASA Y ENERGÍA	55
4.1 MASA DE ESTIÉRCOL Y POTENCIAL ENERGÉTICO.....	55
4.2 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	56
4.3 DEMANDA ENERGÉTICA DEL PROCESO DE PASTEURIZACIÓN.....	59
5. PROPUESTAS DE MEJORAS.....	61
5.1 PROPUESTAS DE MEJORA CALDERA.....	61
5.1.1 DEMANDA ENERGÉTICA DE LA CALDERA AISLADA.....	61
5.1.2 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA CALDERA AISLADA.....	63
5.1.3 DEMANDA ENERGÉTICA DE LA CALDERA AISLADA Y CALEFACCIONADA CON BIOGÁS	64
5.1.4 ANALISIS ECONOMICO DEL AISLAMIENTO DE LA CALDERA Y CALEFACCION CON BIÓGAS.....	64
5.1.5 DISMINUCIÓN DE GEI POR LA IMPLEMENTACIÓN DE BIOGÁS.....	65
5.2 PROPUESTAS DE MEJORA AL BIODIGESTOR.....	66
5.2.1 COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL BIODIGESTOR SIN AISLAMIENTO.....	67
5.2.2 COMPORTAMIENTO DEL BIODIGESTOR CON DIFERENTES ESPESORES DE EPS.....	67
5.2.3 INVERSIÓN Y TIPOS DE CALEFACCIÓN DEL BIODIGESTOR SIN AISLAMIENTO Y CON AISLAMIENTO.....	68
5.2.4 ANALISIS DE COSTOS DE CADA TIPO DE INVERSIÓN.....	72
5.3 CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS.....	74
BIBLIOGRAFÍA	78
ANEXO	84
ANEXO I: CÁLCULO COEFICIENTE CONVECTIVO “H” CALDERA SIN AISLANTE	84
ANEXO II: CÁLCULO COEFICIENTE CONVECTIVO (H) CALDERA CON AISLAMIENTO	87

<i>ANEXO III: ELEMENTOS DEL PROGRAMA SIMUSOL.....</i>	<i>89</i>
<i>ANEXO IV: MODELOS DE TRANFERENCIAS DE CALOR DE LA CALDERA.....</i>	<i>92</i>
<i>ANEXO V: RESULTADOS DE SIMULACIONES DE LA CALDERA SIN Y CON AISLAMIENTO.....</i>	<i>95</i>
<i>ANEXO VI: CÁLCULO COEFICIENTE DE CONVECCIÓN DEL BIODIGESTOR SIN AISLAMIENTO</i> <i>.....</i>	<i>99</i>
<i>ANEXO VII: CÁLCULO COEFICIENTE DE CONVECCIÓN DEL BIODIGESTOR AISLADO CON</i> <i>TERGOPOL.....</i>	<i>101</i>
<i>ANEXO VIII: MODELOS DE TRANFERENCIA DE CALOR DEL BIODIGESTOR SIN AISLAMIENTO</i> <i>.....</i>	<i>102</i>
<i>ANEXO IX: MODELOS DE TRANFERENCIA DE CALOR DEL BIODIGESTOR CON AISLAMIENTO</i> <i>.....</i>	<i>104</i>
<i>ANEXO X: RESULTADOS DE SIMULACIONES DEL BIODIGESTOR SIN AISLAMIENTO.....</i>	<i>107</i>
<i>ANEXO XI: RESULTADOS DE SIMULACIONES DEL BIODIGESTOR CON AISLAMIENTO.....</i>	<i>109</i>
<i>ANEXO XII: RESULTADOS DE SIMULACIONES DEL BIODIGESTOR AISLADO Y</i> <i>CALEFACCIONADO.....</i>	<i>113</i>
<i>ANEXO XIII: RESULTADOS DE SIMULACIONES CONDICIONES MEDIA DE INVIERNO Y</i> <i>VERANO BIODIGESTOR SIN AISLAMIENTO.....</i>	<i>116</i>
<i>ANEXO XIV: RESULTADOS DE SIMULACIONES CONDICIONES EXTREMAS DE INVIERNO Y</i> <i>VERANO BIODIGESTOR AISLADO.....</i>	<i>117</i>
<i>ANEXO XV. COSTOS DE LOS DIFERENTES ESPESORES DE EPS.....</i>	<i>118</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura N° 1 (Izquierda): Ubicación de la provincia de Mendoza en Argentina. Fuente: Sitio web “Todo Argentina”.</i>	1
<i>Figura N° 2 (Derecha): Ubicación del departamento Lavalle en la Provincia de Mendoza. Fuente: “Agua, drenaje y salinización en Mendoza (argentina). El departamento de Lavalle”.</i>	1
<i>Figura N° 3: Ubicación del distrito Ingeniero Gustavo André del departamento Lavalle (recuadro en Negro y punto Naranja). Fuente de Elaboración Propia basado en información del Plan Municipal de Ordenamiento Territorial (PMOT) del departamento de Lavalle</i>	2
<i>Figura N° 4: Ubicación y acceso al “Aula Satélite Unidad N°4 – Colonia y Granja Penal -Juan Bautista Vitale Nocera”. Fuente de Elaboración propia en base a imágenes satelitales de Google Earth.</i>	2
<i>Figura N° 5: Estructura general de los hongos pertenecientes al filum Basidiomycota. Fuente: Suarez Arango y col., 2010.</i>	9
<i>Figura N° 6 (Izquierda): Imagen de Ganoderma lucidum perteneciente al filum Basidiomycota. Fuente: Ibarra Islas y col. (2019).</i>	9
<i>Figura N° 7 (Derecha): Lentinula edodes. Ejemplos de especies pertenecientes al filum Basidiomycota. Fuente: Ibarra Islas y col. (2019).</i>	9
<i>Figura N° 8: Micelio del hongo Pleurotus ostreatus que adopta coloración blanquecina sobre el sustrato que degrada. Fuente: Quispe Vargas y col., (2021).</i>	10
<i>Figura N° 9: Variabilidad de colores observados en los sombreros de genero Pleurotus spp. Fuente: Salomones y col, (2017).</i>	11
<i>Figura N° 10: Imagen del sombrero en forma de ostra u oreja del hongo Pleurotus ostreatus. Fuente: Shen, 2017.</i>	11
<i>Figura N° 11: Etapas de la producción del Hongo Pleurotus Ostreatus. Elaboración propia basado en Jaramillo Mejía, 2014. & Quispe Vargas,2021.</i>	12
<i>Figura N° 12: Sustratos utilizados para el cultivo del Hongo Pleurotus Ostreatus. Fuente: Quispe Vargas, 2021.</i>	13
<i>Figura N° 13: Representación esquemática de los mecanismos de transferencia de calor. Fuente: IDEA, 2007.</i>	14
<i>Figura N° 14: Mecanismo de conducción a través de un sólido o fluido estacionario. Fuente: Levenspiel, 1998.</i>	15
<i>Figura N° 15: Mecanismos de transferencia de calor por convección. Fuente: Levenspiel, 1998.</i>	16
<i>Figura N° 16: Etapas de la digestión anaeróbica y reacciones químicas involucradas. Fuente: Li, Chun y Wu (2019).</i>	21
<i>Figura N° 17: Representación de sólidos totales y volátiles en una muestra de sustrato. Fuente de elaboración propia, 2022.</i>	23
<i>Figura N° 18: Producción de Biogás en función de la temperatura. Fuente: FAO y col., 2011.</i>	26
<i>Figura N° 19: Composición del Biogás en función del PH que poseen la mezcla Guano -Tuna. Fuente: Varnero y Arellano, 1991 citado en FAO, 2011.</i>	27
<i>Figura N° 20: Concentración de compuestos en la biodigestión que resulta inhibidora del proceso. Fuente: Hilbert, 2011.</i>	28
<i>Figura N° 21: Biodigestor Chino (Domo fijo). Fuente: FAO, 2011.</i>	31
<i>Figura N° 22: Biodigestor Hindú (domo flotante). Fuente: FAO, 2011.</i>	31
<i>Figura N° 23: Biodigestor Taiwanés (alargado, bolsa o balón). Fuente: Vega. D y col., 2022).</i>	32
<i>Figura N° 24: Biodigestor de Mezcla completa. FAO, 2011.</i>	32
<i>Figura N° 25: Ubicación geográficas de plantas relevadas en Argentina. Fuente: Goicoa, 2016.</i>	35
<i>Figura N° 26: Esquema del invernadero de producción de la CCT N° 6-038 Escuela Ing. César Cipolletti, ubicado en el Aula Satélite Unidad N°4 de la Colonia y Granja Penal Gustavo André. Fuente: Méndez, 2022.</i>	46

<i>Figura N° 27: Imagen del Pasteurizador rotativo junto con la caldera. Fuente de elaboración propia, 2022.</i>	47
<i>Figura N° 28: Caldera del Invernadero de la Granja Penal Gustavo André. Fuente de elaboración propia, 2022.</i>	47
<i>Figura N° 29: Etapa de preparación y pasteurización del sustrato en el Invernadero del Penal de Gustavo André. Fuente de elaboración propia, 2022.</i>	49
<i>Figura N° 30 (Izquierda): Biodigestor (gris) con su gasómetro al costado (azul). Fuente elaboración propia, 2022.</i>	51
<i>Figura N° 31 (Derecho): Intercambiador de calor en forma de serpentín y hélice de mezcla. Fuente de elaboración propia, 2022.</i>	51
<i>Figura N° 32: Estructura de sostén del colector solar y su acumulador. Fuente de elaboración propia, 2022.</i>	51
<i>Figura N° 33: Imagen de Google Earth que muestra la distancia entre la Estación meteorológica de la localidad de Ingeniero Gustavo André y la estación meteorológica de la localidad de Tres Porteñas. Fuente de elaboración propia, 2022.</i>	52
<i>Figura N° 34: Placa de Lana de Vidrio de 25 cm de espesor para aislamiento de la caldera. Fuente: Mercado Libre, 2023.</i>	63
<i>Figura N° 35: Placas de EPS (Poliestireno) de 1m². Fuente: Easy Cencosud, 2023.</i>	68
<i>Figura N° 36: Resistencia eléctrica de 85 cm de largo con termostato. Fuente Mercado Libre, marzo 2023.</i>	70
<i>Figura N° 37: Termotanque Solar 200 litros de Acero Inoxidable. Fuente de Mercado Libre, marzo de 2023.</i>	72
<i>Figura N° 38: Modelo esquemático sencillo con los principales nodos de transferencia de calor utilizados en la simulación con SIMUSOL para la caldera sin aislamiento. Fuente de elaboración propia, 2023.</i>	92
<i>Figura N° 39: Modelo esquemático sencillo con los principales nodos de transferencia de calor utilizados en la simulación con SIMUSOL para la caldera aislada con lana de vidrio. Fuente de elaboración propia, 2023.</i>	92
<i>Figura N° 40: Modelo de transferencia de calor en caldera. Fuente de Elaboración Propia.</i>	93
<i>Figura N° 41: Modelo de transferencias de calor en caldera aislada con lana de vidrio. Fuente de Elaboración propia.</i>	94
<i>Figura N° 42: Modelo esquemático sencillo con los principales nodos de transferencia de calor utilizados en la simulación con SIMUSOL para biodigestor sin aislamiento. Fuente de elaboración propia, 2023.</i>	102
<i>Figura N° 43: Modelo de transferencia de calor del biodigestor. Fuente de elaboración propia.</i>	103
<i>Figura N° 44: Modelo esquemático sencillo con los principales nodos de transferencia de calor utilizados en la simulación con SIMUSOL para biodigestor con aislamiento. Fuente de elaboración propia, 2023.</i>	104
<i>Figura N° 45: Modelo de transferencia de calor del Biodigestor con aislamiento de EPS. Fuente de elaboración propia.</i>	105
<i>Figura N° 46: Modelo de transferencias de calor el Biodigestor con aislamiento de EPS y calefacción. Fuente de elaboración propia.</i>	106
<i>Figura N° 47: Imagen y precio de una (1) plancha de Telgopor de 2cm de espesor. Fuente: https://www.easy.com.ar, marzo del 2023. Costo de 3,67 dólares la unidad según cotización dólar oficial del BCRA el 31 de marzo del 2023 de \$215.</i>	118
<i>Figura N° 48: Imagen y precio de una (1) plancha de Telgopor de 5 cm de espesor. Fuente: Mercado Libre, marzo del 2023. Costo de 5,03 dólares la unidad según cotización dólar oficial del BCRA el 31 de marzo del 2023 de \$215.</i>	118
<i>Figura N° 49: Imagen y precio de una (1) plancha de Telgopor de 10 cm de espesor. Fuente: Mercado Libre, marzo del 2023. Costo de 9,15 dólares la unidad según cotización dólar oficial del BCRA el 31 de marzo del 2023 de \$215.</i>	119
<i>Figura N° 50: Garrafa de GPL (45 kg) YPF. Fuente Akitom S.A. (Distribuidor oficial YPF S.A. a fecha 31 de marzo del año 2023. Costo de 55,81 dólares la unidad según cotización dólar oficial del BCRA el 31 de marzo del 2023 de \$215.</i>	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Conductividades térmicas (k) para diferentes materiales a temperatura ambiente (300 K). Fuente: Çengel y col. 2011 & Thibault, 2010.....	15
Tabla N° 2: Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección. Fuente: Larco Dávalos y col.2014.....	17
Tabla N° 3: Coeficientes de emisividad (ϵ) para diferentes materiales a temperatura ambiente (300 K). Fuente: Levenspiel, 1998.....	18
Tabla N° 4: Composición del Biogás. Fuente: Solano Galvis, 2018.	19
Tabla N° 5: Tipos de biomasa residual. Fuente: Varnero y Arellano, 1991 citado en FAO, 2011.....	22
Tabla N° 6: Volumen de estiércol producido y potencial de rendimiento por especie. Fuente: Hilbert y col., 2011.	22
Tabla N° 7: Grupos orgánicos de los residuos vegetal y animal (Valores promedios, en base seca). Fuente: FAO, 2011.....	23
Tabla N° 8: Clasificación de los microorganismos según su rango de temperatura de operación. Fuente: Guisasola, 2022.....	25
Tabla N° 9: Reglas empíricas para la evaluación de relaciones FOS/TAC (valores empíricos proporcionados por DEULA-Nienburg). Fuente: Reynoso y col., 2017.	28
Tabla N° 10: Clasificación de los Biodigestores. Fuente: Hilbert, 2011.....	30
Tabla N° 11: Composición energética de 1m ³ de biogás con 65% CH ₄ y su equivalencia con otras fuentes de energía. Fuente: Martí Herrero 2020.	33
Tabla N° 12: Comparación de valores caloríficos y factores de emisión de CO ₂ para diferentes combustibles. Fuente: Briseño Arciniega y col., 2017.....	34
Tabla N° 13: Temperaturas registradas en la estación meteorológica de Gustavo André y alrededores (1998- 2018). Fuente: Elaboración propia, 2022.....	53
Tabla N° 14: Radiación solar (Wh/m ² * día) registrados en la localidad de Gustavo André y alrededores periodo (1998-2018). Fuente: Elaboración propia, 2022.	53
Tabla N° 15: Velocidad de viento media registrada en la localidad de Gustavo André y alrededores. Fuente: Elaboración propia, 2022.....	54
Tabla N° 16: Porcentaje de humedad (%) registrados en la localidad de Gustavo André y alrededores, 2022. Fuente: Elaboración propia, 2022.....	54
Tabla N° 17: Características del guano de Cabra y Oveja. Fuente: Elaboración propia, basado en estudio realizado por (Bartucci L.S y col., 2020) y en (Martí Herrero y col., 2019).....	55
Tabla N° 18: Propiedades del Propano comercial de YPF S.A. medido en CNPT (1 ATM Y 15°C). Fuente: Elaboración propia,2022 basado en información de YPF S.A. ⁽⁷⁾	59
Tabla N° 19: Pérdidas de calor (kW), % de reducción de pérdidas energéticas para cada tipo de espesor comercial de lana de vidrio respecto a la caldera sin aislar. Fuente: Elaboración Propia, 2022.	62
Tabla N° 20: Variación Térmica (°C/día) del sustrato del biodigestor según diferentes espesores de aislamiento de Telgopor. Fuente de elaboración propia.	67
Tabla N° 21:Costo de aislamiento del biodigestor para cada espesor de EPS. Fuente de elaboración propia (31de marzo del 2023).	68
Tabla N° 22: Potencia (kW) simulada, horas de calefacción(h) simulada, Energía (kWh) calculada, N° de calefacciones simuladas por semana, Energía semanal (kWh) calculada. Fuente de elaboración propia.	69
Tabla N° 23: Costo Semanal (\$) y Costo Total Anual. Fuente de elaboración propia (31 de marzo del 2023).	70
Tabla N° 24: Inversión Total (US\$) de cada tipo de aislamiento con resistencia eléctrica como método de calefacción para el biodigestor del Penal. Fuente de elaboración propia (marzo del 2023).	71

Tabla N° 25: Inversión Total (\$) para cada espesor aislante con la instalación de un colector solar como mecanismo de calefacción del biodigestor e incorporación de aislamiento en la caldera. Fuente de elaboración propia.....	72
Tabla N° 26: Valor Actual de los Egresos (VAE) para los periodos de 3, 5 y 10 años correspondientes a los diferentes espesores de aislamiento calefaccionados con resistencia eléctrica. Fuente de elaboración Propia.....	73
Tabla N° 27: Valor Actual de los Egresos (VAE) para los periodos de 3, 5 y 10 años correspondientes a los diferentes espesores de aislamiento calefaccionados con resistencia eléctrica. Fuente de elaboración Propia.....	73
Tabla N° 28: Elementos utilizados para graficar modelos térmicos y simular con el software "SIMUSOL". Fuente de elaboración propia basado en (INENCO – CONICET, 2016).....	89
Tabla N° 29: Nomenclatura de las variables obtenidas como resultado de la simulación con SIMUSOL para la caldera sin aislamiento. Fuente de elaboración propia,2023.....	95
Tabla N° 30: Nomenclatura de las variables obtenidas como resultado de la simulación con SIMUSOL para la caldera con aislamiento. Fuente de elaboración propia,2023.....	96
Tabla N° 31: Nomenclatura de las variables obtenidas como resultado de la simulación con SIMUSOL para el biodigestor sin aislamiento. Fuente: Elaboración propia,2023.....	107
Tabla N° 32: Nomenclatura de las variables obtenidas como resultado de la simulación con SIMUSOL para el biodigestor con aislamiento. Fuente: Elaboración propia,2023.....	109

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación N° 1: Masa de estiércol diaria (kg estiércol /día) (Manrique y col., 2015).....	39
Ecuación N° 2: Masa de Sólidos Volátiles (SV) producidos diariamente por animal de una especie (Manrique y col., 2015).....	39
Ecuación N° 3: Índice de Producción de Metano (IPM) (Manrique y col., 2015).....	40
Ecuación N° 4: Potencial Energético Anual (MJ/año) (Manrique y col.,2015).....	40
Ecuación N° 5: Tiempo de Retención Hidráulica (Mazeh y col., 2022).	41
Ecuación N° 6: Volumen de Carga diaria (FAO, 2011).	41
Ecuación N° 7: Dilución Sólidos Totales (ST) en el sustrato (FAO,2011).....	42
Ecuación N° 8: Cantidad de GLP por pasteurización.....	59
Ecuación N° 9: Energía por pasteurización (kcal/pasteurización).....	59
Ecuación N° 10: Biogás por hora de pasteurizado.	60
Ecuación N° 11: Ecuación de VAE (Valor Actual de Egresos). Fuente: Tulián y Mónaco, 1999.....	73
Ecuación N° 12: Ecuación de Coeficiente Convectivo "Hcov".	84
Ecuación N° 13: Temperatura de la capa límite (Tf).....	84
Ecuación N° 14: Número de Grashof(GR).	85
Ecuación N° 15: Número de Raleigh (Ra).....	85
Ecuación N° 16: Número de Nusselt (Ne) para Número de Raleigh (Ra) entre 10^4 y 10^9	86
Ecuación N° 17: Número de Nusselt (Nu) para Convección Forzada (Incropera, 1999).....	99
Ecuación N° 18: Número de Reynolds (Re).....	100

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 1: Porcentaje de las especies de hongos involucradas en la producción mundial al año 2018-2019. Fuente: Elaboración propia, basado en (Singh y otros, 2021).....	7
Gráfico N° 2 Ubicación de las plantas de biogás relevadas. Fuente: Goicoa, 2016.....	36

Gráfico N° 3: Sustratos comúnmente utilizados. Fuente: Goicoa, 2016.....	36
Gráfico N° 4: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) de la caldera sin aislamiento. Fuente de elaboración propia,2023.....	95
Gráfico N° 5: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) de la caldera aislada con 2,5 cm de espesor de lana de vidrio. Fuente de elaboración propia.....	96
Gráfico N° 6: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) de la caldera aislada con 5 cm de espesor de lana de vidrio. Fuente de elaboración propia.....	97
Gráfico N° 7: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) de la caldera aislada con 8 cm de espesor de lana de vidrio. Fuente de elaboración propia.....	97
Gráfico N° 8: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) de la caldera aislada con 10cm de espesor de lana de vidrio. Fuente de elaboración propia.....	98
Gráfico N° 9: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor sin aislamiento. Elaboración propia.....	108
Gráfico N° 10: Nomenclatura de las variables obtenidas como resultado de la simulación con SIMUSOL para el biodigestor con aislamiento. Fuente de elaboración propia,2023.....	109
Gráfico N° 11: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 5 cm de EPS. Fuente de elaboración propia.....	110
Gráfico N° 12: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 10 cm de EPS. Fuente de elaboración propia.....	110
Gráfico N° 13: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 15 cm de EPS. Fuente de elaboración propia.....	111
Gráfico N° 14: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 20 cm de EPS. Fuente de elaboración propia.....	111
Gráfico N° 15: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 25 cm de EPS. Fuente de elaboración propia.....	112
Gráfico N° 16: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 2 cm de EPS y calefaccionado. Fuente de elaboración propia.....	113
Gráfico N° 17: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 5 cm de EPS y calefaccionado. Fuente de elaboración propia.....	113
Gráfico N° 18: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 10 cm de EPS y calefaccionado. Fuente de elaboración propia.....	114
Gráfico N° 19: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 15 cm de EPS y calefaccionado. Fuente de elaboración propia.....	114
Gráfico N° 20: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 20 cm de EPS y calefaccionado. Fuente de elaboración propia.....	115
Gráfico N° 21: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 25 cm de EPS y calefaccionado. Fuente de elaboración propia.....	115
Gráfico N° 22: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor sin aislamiento en condiciones de invierno. Fuente de elaboración propia.....	116
Gráfico N° 23: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor sin aislamiento en condiciones de verano. Fuente de elaboración propia.....	116
Gráfico N° 24: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor aislado con 5 cm de EPS en condiciones extremas de invierno. Fuente de elaboración propia.....	117
Gráfico N° 25: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor aislado con 5 cm de EPS en condiciones extremas de verano. Fuente de elaboración propia.....	117

DEFINICIONES

CNPT: Condiciones normales de presión y temperatura (1atm y 15°C) gas.

Nm³ (Normal metro cúbico): Hace referencia a CNPT Condiciones Normales de Presión y Temperatura de un gas.

CO_{2eq}: Abreviatura de dióxido de carbono equivalente, es una medida utilizada para expresar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como una única cantidad de dióxido de carbono (CO₂) que tendría el mismo potencial de calentamiento global durante un período de tiempo determinado.

Poder Calorífico Inferior (PCI): Se refiere a la cantidad de energía liberada durante la combustión de un combustible, teniendo en cuenta la condensación del agua contenida en los productos de la combustión. Esto significa que el PCI tiene en cuenta el calor latente del vapor de agua formado durante la combustión y lo resta de la cantidad total de calor liberado.

Poder Calorífico Superior (PCS): El poder calorífico superior (PCS), es la cantidad total de calor liberada durante la combustión de un combustible, sin tener en cuenta la condensación del agua contenida en los productos de la combustión. El PCS representa la máxima cantidad de calor disponible para su uso.

EPS: El material EPS es una sigla que proviene del inglés “Expanded Polystyrene”, que significa Poliestireno Expandido, también conocido como espuma de poliestireno.

1. INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN EN LA COLONIA Y GRANJA DEL PENAL

En la zona rural del Distrito de Gustavo André, Departamento de Lavalle, Provincia de Mendoza, Argentina, funciona el "Aula Satélite Unidad N°4 - Colonia y Granja Penal - Juan Bautista Vitale Nocera", ubicado entre las coordenadas geográficas (-32,7151990 y -68,3460900). En dicho lugar se alojan, en promedio, 90 personas privadas de su libertad (PPL), cantidad que varía con el tiempo por la dinámica de ingresos y egresos que se produce en el Penal.

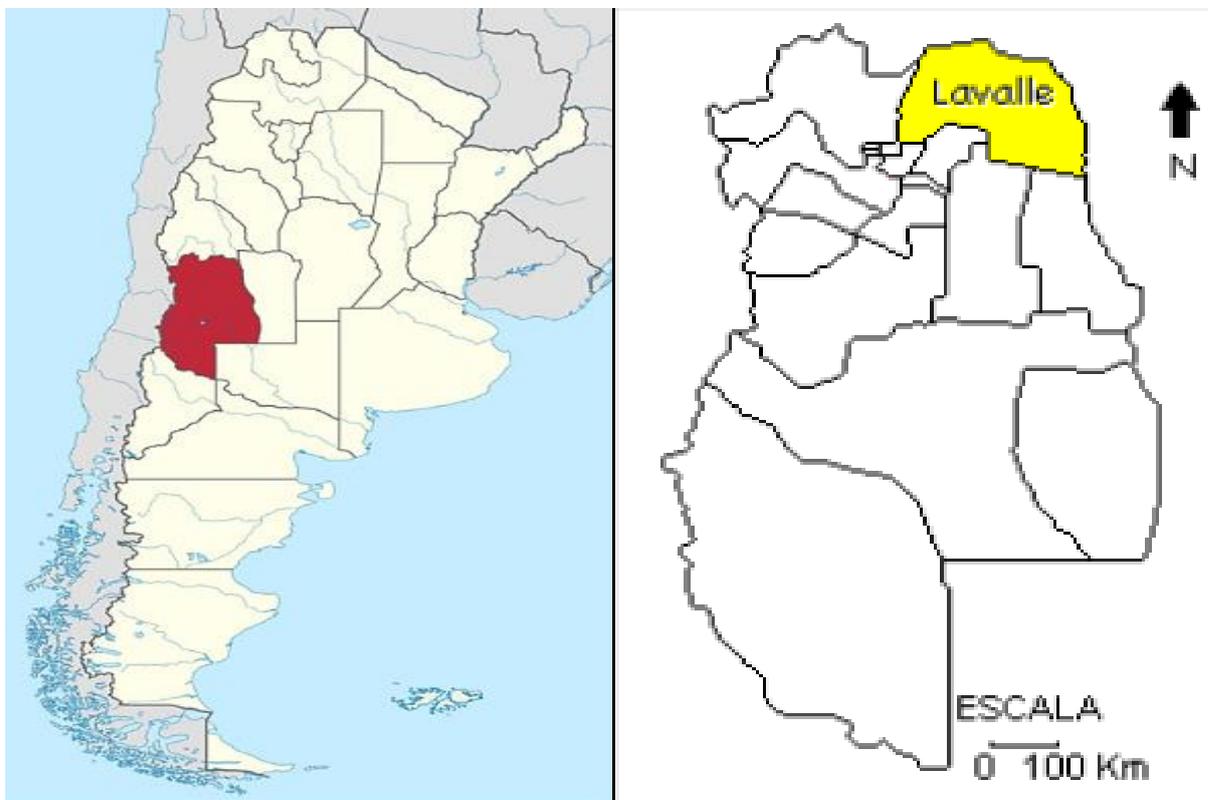


Figura N° 1 (Izquierda): Ubicación de la provincia de Mendoza en Argentina. Fuente: Sitio web "Todo Argentina".¹

Figura N° 2 (Derecha): Ubicación del departamento Lavalle en la Provincia de Mendoza. Fuente: "Agua, drenaje y salinización en Mendoza (Argentina). El departamento de Lavalle".²

La Colonia y Granja Penal tiene una superficie de 20 ha en el que se desarrollan diversas actividades a cargo del personal del Centro de Capacitación para el Trabajo (CCT) N° 6-038 Escuela Ing. César Cipolletti. Estas actividades tienen como objetivo brindarles a los internos actividades educativas y laborales para que puedan completar sus estudios, aprender un oficio y facilitar así su reinserción en la sociedad.

¹ <https://www.todo-argentina.net/geografia/provincias/mendoza/>

² <https://old.aecr.org/web/congresos/1999/25RER/paginas/II8.html>

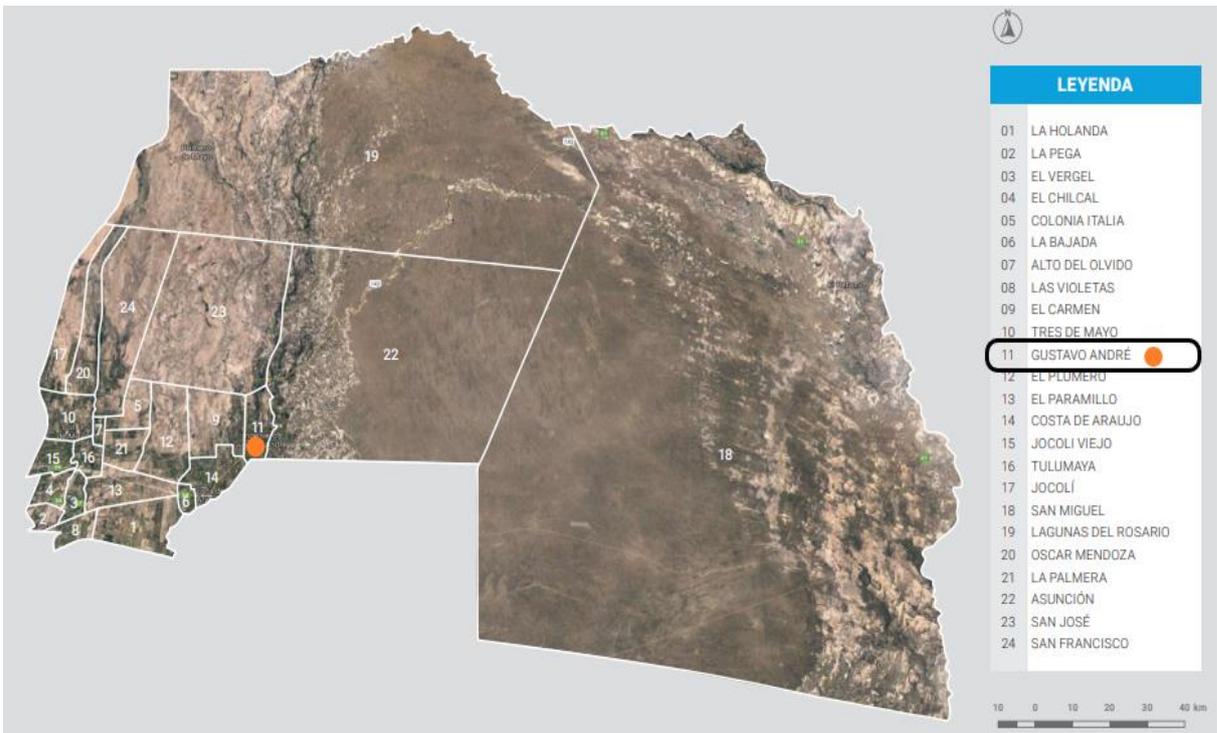


Figura N° 3: Ubicación del distrito Ingeniero Gustavo André del departamento Lavalle (recuadro en Negro y punto Naranja). Fuente de Elaboración Propia basado en información del Plan Municipal de Ordenamiento Territorial (PMOT) del departamento de Lavalle ³.

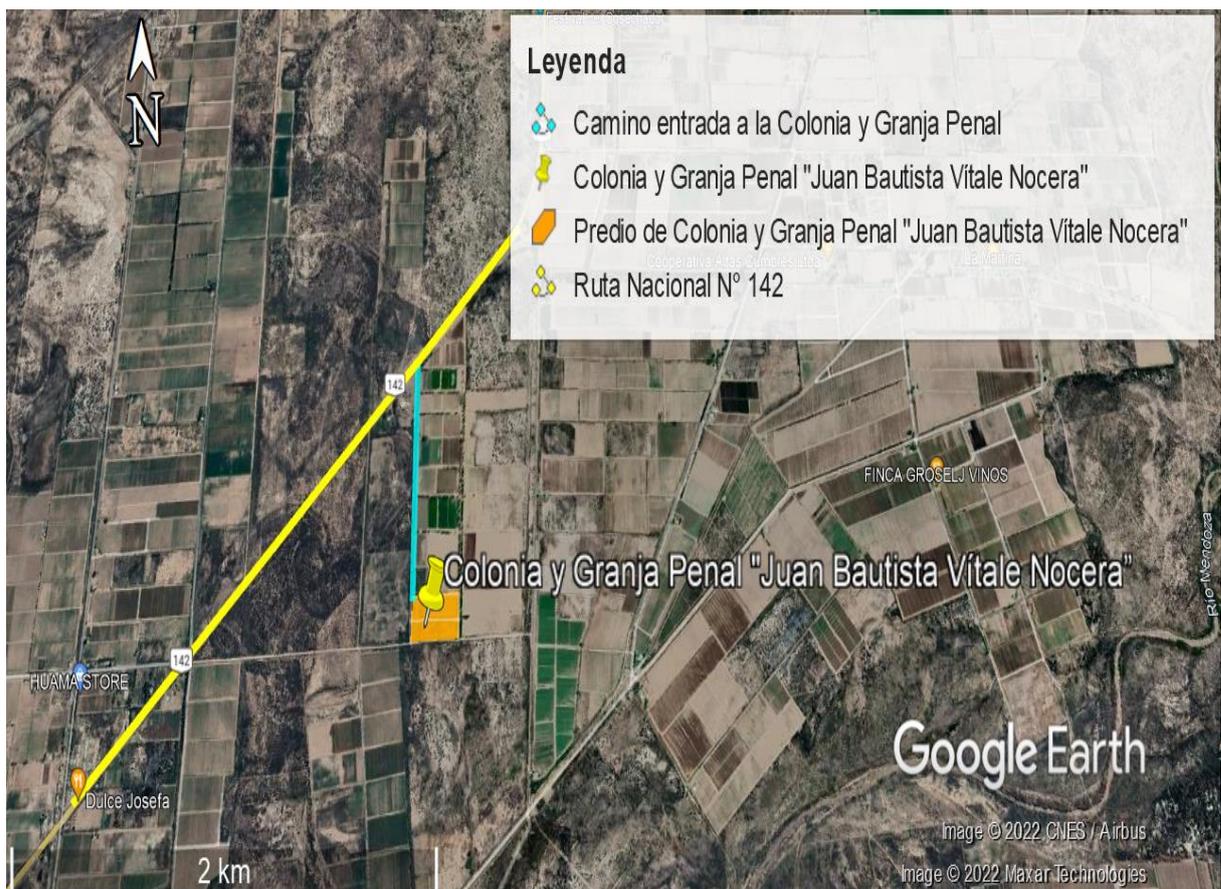


Figura N° 4: Ubicación y acceso al "Aula Satélite Unidad N°4 – Colonia y Granja Penal -Juan Bautista Vitale Nocera". Fuente de Elaboración propia en base a imágenes satelitales de Google Earth.

³<http://lavallemendoza.gov.ar/public/pdf/ordenamiento/Libro-Lavalle.pdf>

Las actividades productivas que se realizan en el Penal, con el objetivo de brindar capacitación a las PPL, son la producción caprina y ovina. Ambas resultan ser la actividad más importante y relevante en el penal, acompañada por cultivos extensivos de pasturas como alfalfa, sorgo y cebada destinados a estos animales (Millán, 2022). En el sector del predio donde funciona el CCT, se realiza la producción de hongos gírgolas en un invernadero, además de la producción hortícola orgánica en huerta. Asimismo, en el predio de la Colonia hay un galpón donde se realizan actividades de carpintería y metalúrgica.

Como se mencionó, una de las actividades que se ha venido desarrollando con mayor relevancia en el lugar es el cultivo del hongo comestible de la especie "*Pleurotus ostreatus*" var. "*Florinda gírgolas*", conocido popularmente como "gírgola" u "hongo ostra". Este cultivo se realiza en el galpón invernadero, donde se mantienen de forma controlada determinados factores ambientales, como la temperatura y la humedad, para optimizar los rendimientos del proceso productivo del hongo (Belletini y col., 2015).

Para el cultivo de los hongos se utiliza como sustrato virutas de álamo obtenidas de la carpintería que funciona en el penal, como así también de cualquier carpintería de la zona de Gustavo André y/o del gran Mendoza. Se puede entender que la producción de gírgolas es una forma de tratamiento y reducción de residuos sólidos, especialmente lignocelulósicos (Pérez Chávez y col., 2019). De acuerdo con Méndez (2022), docente del CCT N° 6-038 y director del proyecto de producción de hongos gírgolas en la Colonia, del total de sustrato inicial, un 70% es consumido y degradado por el cultivo de hongos, quedando solamente un 30% de residuos que se destina a compostaje con lombrices, denominado "lombricultura", para ser utilizado finalmente en la huerta orgánica del predio.

El cultivo de *Pleurotus ostreatus* implica una serie de etapas de crecimiento y desarrollo que deben realizarse bajo condiciones óptimas para obtener la máxima productividad. Estas etapas son la obtención de semilla, la pasteurización del sustrato, la siembra, la incubación o colonización, la inducción o fructificación, la cosecha, el embalaje y el almacenamiento (Quispe Vargas y col., 2021).

Una de las etapas más importantes del proceso es la Pasteurización (Jaramillo Mejía y col., 2014). Según Méndez (2022), en el penal se lleva a cabo una desinfección completa del sustrato, donde crecerá el hongo, aplicando vapor caliente proveniente de una caldera al sustrato dentro del pasteurizador durante 2 horas. La temperatura que debe alcanzar el sustrato debe permanecer entre 70°C y 80°C. La caldera que suministra el vapor al pasteurizador utiliza como fuente de energía Gas Licuado de Petróleo (GLP).

Además de asegurar una temperatura óptima en la etapa de pasteurización, es importante garantizar la mantención de la temperatura óptima durante la etapa de incubación y la etapa de producción o fructificación. Para la etapa de incubación, lo óptimo es mantener una temperatura de 25 °C, mientras que, para la etapa de producción, es ideal una temperatura entre 22-25 °C (Belletini y col., 2015).

Ahora bien, la localidad de Gustavo André se encuentra en la provincia fitogeográfica del Monte, caracterizada por una marcada amplitud térmica diaria e interanual y un ambiente árido (Cabrera, 1976). De acuerdo al director del proyecto de hongos de la Colonia (Méndez, 2021), las condiciones ambientales, junto a la falta de aislamiento y calefacción en la caldera

del pasteurizador y en el galpón de producción, afectan negativamente los rendimientos de producción del hongo *Girgolas*.

Por otra parte, las actividades agropecuarias llevadas a cabo en la Colonia y Granja del Penal generan principalmente residuos orgánicos, los cuales son utilizados como fertilizantes y abonos en los cultivos. No obstante, una parte de estos residuos se podría aprovechar para producir biogás, generando un biocombustible gaseoso que podría alimentar la caldera utilizada en la etapa de pasteurización. Por ello, se considera necesario cuantificar estos residuos para determinar su potencial energético.

El sector donde funciona la escuela cuenta con un biodigestor instalado gracias al proyecto “Cultivando Inclusión con Energías Renovables”, llevado a cabo como parte del programa “Mauricio López”, con la colaboración de la Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo), el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), la Dirección General de Escuelas (DGE) y el CCT N° 6-038 de la Colonia. El biodigestor se encuentra en la etapa de construcción colectiva y capacitación a las PPL, en pausa desde inicios de 2022. Esta instalación fue pensada con un enfoque educativo y social.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Se identifica la oportunidad de desarrollar esta tesina en el marco del proyecto “Cultivando Inclusión con Energías Renovables”, con el objetivo de contribuir al proceso productivo del hongo *Girgolas* que se realiza en el penal, adoptando un enfoque global de los flujos de energía y formas de optimizarlos. Por tal motivo, se pretende generar una propuesta que favorezca el aporte de energía renovable al proceso productivo de manera sostenible en el tiempo, con los recursos ya disponibles en el penal.

Como se mencionó con anterioridad, se ha instalado un biodigestor en el penal con fines educativos y demostrativos, para mostrar la manera en que la tecnología puede contribuir al proceso productivo del hongo *Girgola*. Sin embargo, se desconoce el aporte energético potencial que el biodigestor puede ofrecer a este proceso utilizando los residuos agropecuarios generados en el penal, los cuales no han sido cuantificados. Asimismo, se desconocen los flujos de energía involucrados en el proceso productivo del hongo.

A partir de lo anterior, es de utilidad realizar una evaluación energética del proceso productivo del hongo, para conocer en qué medida el biogás generado puede contribuir al mismo. Con esta información, posteriormente se podrán formular propuestas de mejoras que optimicen y garanticen el continuo aporte de esta energía renovable a la producción.

Todo lo mencionado previamente se enmarca en un contexto actual, donde resulta de vital importancia buscar procesos productivos más sostenibles e independientes energéticamente de los combustibles fósiles, que contribuyan de manera positiva al medio ambiente, la economía y la sociedad (López y col., 2017).

Entre los aspectos positivos que posee el proyecto, destacan:

- Dimensión Ambiental: Favorecer el aumento del uso de energías renovables en el proceso productivo, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por la utilización de energías fósiles (reemplazo de

garrafas de GLP por biogás) y buscando otras alternativas de aprovechamiento de los residuos orgánicos del penal.

- Dimensión Económica: Disminuir el uso de garrafas de GLP, ahorrando dinero para destinarlo a otros usos en el penal.
- Dimensión Social: Generar un proceso productivo sostenible que mejore las condiciones de vida en el penal, brinde nuevos conocimientos y herramientas laborales, y facilite la reinserción de las Personas Privadas de Libertad (PPL) en la sociedad una vez recuperada su libertad.

1.3 ANTECEDENTES

Los cultivos de especies del género *Pleurotus*, conocidas como "Girgolas", ocupan el segundo lugar en el mercado mundial de los hongos y el primer lugar en China, representando un 25% del total de hongos que produce ese país. Estas especies generalmente se cultivan sobre sustratos lignocelulósicos no compostados con un fin comercial debido a su valor económico considerable. Entre ellas, *P. ostreatus* es la especie más difundida y cultivada del género *Pleurotus* (Jaramillo Mejía y col., 2014).

La producción de *Pleurotus ostreatus* ofrece una prometedora posibilidad para producir un alimento rico en fibras y proteínas, haciendo uso y aprovechando los residuos lignocelulósicos agrícolas, agroindustriales y urbanos. Esta especie genera enzimas como lacasas y peroxidasa de manganeso, que son capaces de degradar materiales lignocelulósicos ricos en lignina, como el aserrín, subproductos del papel y otros residuos agrícolas, así como la biomasa desechada en las plantas de biogás, que contienen alrededor del 40-60% de celulosa y una elevada cantidad de lignina de la materia prima original (Chanakya y col., 2013).

Los hongos de este género son relativamente fáciles de cultivar y producir, debido a que se requieren bajas inversiones para comenzar su cultivo y se adaptan a una variedad de sustratos, ambientes y temperaturas (Bellettini, y col., 2015). Esto los hace útiles para aplicarlos en diversos ámbitos, como por ejemplo en ambientes rurales con exceso de residuos agrícolas o en las cárceles como una importante actividad de reinserción para los internos. Este es el caso de la Unidad Penitenciaria N°4 de Bahía Blanca, donde se desarrolla el Cultivo del hongo "Girgolas" y se llevan a cabo capacitaciones por parte del CONICET, la Universidad Nacional del Sur y la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires⁴.

Por otra parte, la digestión anaeróbica es un proceso realizado en ausencia de oxígeno, llevado a cabo por diferentes microorganismos presentes en la materia orgánica, que la transforman y permiten la obtención de un gas de alto valor calorífico: el biogás. Este se utiliza para abastecer demandas térmicas tanto de hogares como de procesos productivos, generar electricidad y servir como combustible. Además, el proceso anaeróbico contribuye al tratamiento de residuos orgánicos, ofrece la obtención de fertilizantes, requiere de menos espacio y menores costos en general (Ajay y col., 2021).

⁴ <https://cerzos.conicet.gov.ar/BoletinCERZOS/2011-19/capacitacion.html> (2011)

Es sabido que la temperatura dentro del biodigestor es uno de los factores más relevantes para su óptimo funcionamiento. Por esto, en muchas partes del mundo no es posible mantener, de forma pasiva, la temperatura de operación de manera estable del biodigestor a lo largo del día y del año; lo que justifica los esfuerzos y las investigaciones para controlar esta variable mediante métodos como un adecuado aislamiento y calefacción (Ajay y col., 2021).

Se ha demostrado que la calefacción de los biodigestores ha permitido incrementar la temperatura y, por ende, la producción de biogás de hasta un 11,5%. Esto evidencia su importancia principalmente en periodos fríos, donde si la temperatura de operación del biodigestor desciende debajo de los 15°C, se hace prácticamente inviable producir biogás. Además, la calefacción de dichos biodigestores, es posible mediante el uso de energías renovables, como la energía solar (Mahmudul y col., 2020).

Finalmente, existen diversos análisis, estudios, modelos y simulaciones sobre el comportamiento energético de sistemas como calderas, biodigestores y colectores solares. Un ejemplo es el estudio realizado por Martín y col. (2018), el cual implementó un modelo térmico de un biodigestor con el software SIMUSOL para conocer la distribución de los flujos de calor y mejorar el diseño de calefacción y aislamiento térmico.

1.4 HONGOS

1.4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS HONGOS

El Reino Fungi, también conocido como Reino de los Hongos, engloba un amplio grupo de organismos muy versátiles, con variadas morfologías, fisiologías, ciclos de vida, etc. Estos organismos se caracterizan por ser unicelulares o pluricelulares, eucariotas, carentes de clorofila y con paredes celulares formadas por quitina y glucanos, las cuales les otorgan rigidez. Usualmente son filamentosos y ramificados, con estructuras somáticas llamadas hifas. Son aerobios o anaerobios facultativos, heterótrofos y se alimentan mediante la producción de enzimas o absorción de nutrientes. Se reproducen tanto de forma sexual como asexual, a través de esporas (Suarez Arango y col., 2010).

Los hongos se desarrollan mejor en hábitats oscuros y húmedos, con un rango de pH entre 2 y 9. También prosperan en soluciones salinas concentradas y en soluciones azucaradas, así como en un amplio intervalo de temperaturas. Estos organismos están involucrados en diversos fenómenos biológicos y químicos relacionados con la desintegración y descomposición de la materia orgánica, así como en procesos industriales como la fermentación, la producción de medicamentos, alimentos y agroforestales (Ibarra Islas y col., 2019).

El Reino Fungi abarca los filos Chytridiomycota, Zygomycota, Ascomycota y Basidiomycota, que contienen especies como los champiñones, setas, mohos del pan, levaduras y trufas, entre otros (Sierra Salas y col., 2014).

1.4.2 HONGOS COMESTIBLES

A lo largo de la historia se han descrito más de 80.000 especies del Reino Fungi, convirtiéndolo en uno de los más diversos de la Tierra. Este reino cumple importantes funciones ambientales, medicinales y alimenticias (Sierra Salas y col., 2014). Los hongos comestibles son macroscópicos, es decir, visibles a simple vista y están incluidos dentro de unas 2.000 especies de esas más de 80.000 especies descritas del reino de los hongos, con diferentes grados de comestibilidad y aceptación entre sus consumidores. Aunque solo 200 especies han sido utilizadas como alimento en el mundo, menos de una cuarta parte (35 especies) resultan ser cultivadas comercialmente (Jaramillo Mejía y col., 2014).

De las 35 especies de hongos cultivados con fines comerciales, seis géneros (Gráfico N°1) comprenden el 85 % de la producción mundial (Sánchez y col, 2017). De acuerdo con información recopilada entre 2018 y 2019, *Lentinula edodes* (Shiitake) es el hongo más cultivado con un 26 % de producción mundial, seguido por *Auricularia* spp. (21 %), *Pleurotus ostreatus* (16 %), *Agaricus bisporus* (Champiñón) con el 11 %, *Flammulina velutipes* (7 %), *Pleurotus eryngii* (5 %) y otras especies (14 %) (Singh y otros, 2021). Esta situación es muy distinta a la de hace 30 años, época en la que el champiñón representaba casi el 56 % de la oferta mundial (Sánchez y col, 2017).

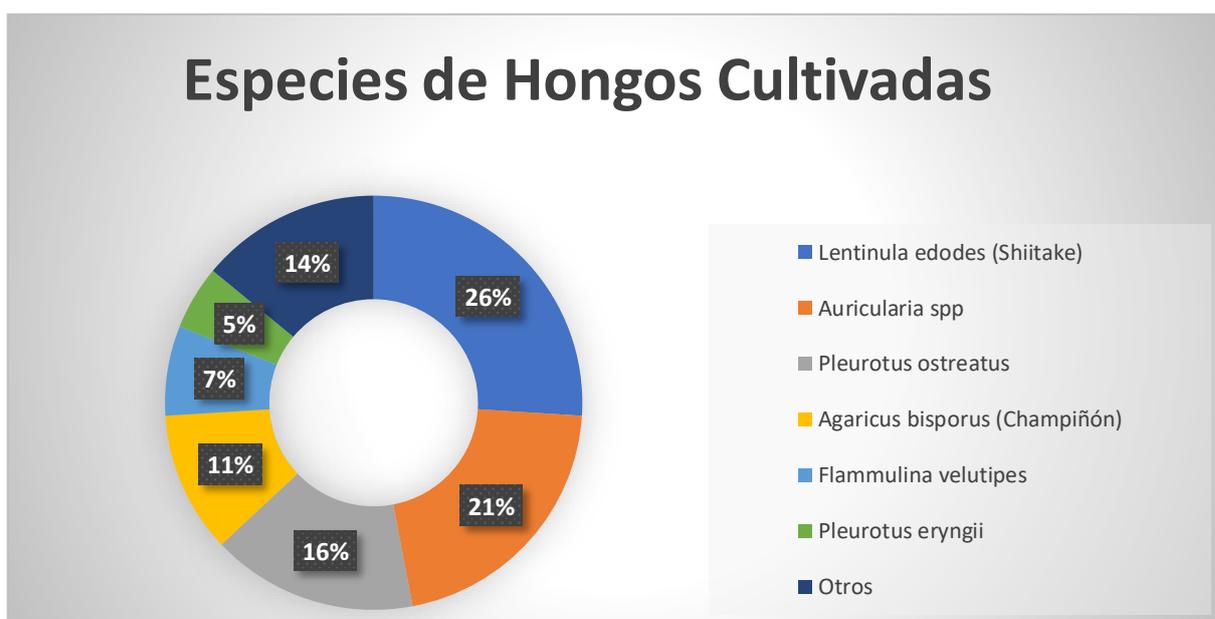


Gráfico N° 1: Porcentaje de las especies de hongos involucradas en la producción mundial al año 2018-2019. Fuente: Elaboración propia, basado en (Singh y otros, 2021).

Los hongos comestibles son una importante fuente de nutrientes, ya que contienen entre un 20% y un 35% de proteínas en peso seco. Son bajos en lípidos y grasas saturadas, altos en fibras, ricos en minerales y vitaminas (vitamina C y D). Estos tienen una gran cantidad de beneficios para la salud, como propiedades reductoras del estrés, inmunoestimulantes y antioxidantes, así como propiedades anticancerígenas (Belletini y col., 2015).

El cultivo de hongos es una industria biotecnológica en constante expansión y que adquiere cada vez mayor relevancia en el ámbito económico, social y ambiental en muchos países. Esto se debe a que los cultivos tienen la capacidad de proporcionar altos rendimientos productivos, generar trabajo, aprovechar una gran variedad de desechos

agroindustriales y forestales, lo que genera un impacto ambiental positivo en la disposición final de estos residuos (Piña Guzmán y col., 2015).

1.4.3 HISTORIA, ESTADO ACTUAL Y TENDENCIA DE LA PRODUCCIÓN DE LOS HONGOS COMESTIBLES EN EL MUNDO Y EN ARGENTINA

El cultivo de hongos comestibles es una actividad milenaria que se remonta al continente de Asia, donde se cultivaron especies como *Lentinula edodes* y *Auricularia* spp. Asimismo, Europa contribuyó con el cultivo del champiñón (*Agaricus bisporus*). El desarrollo a escala industrial de esta actividad empezó a tener lugar en la segunda mitad del siglo XX, gracias al desarrollo de nuevas técnicas y mejoramiento de las existentes (Pincheira Garcés y col., 2014).

Según Sánchez y col. (2017), la producción mundial de hongos comestibles cultivados aumentó considerablemente de 1 millón de toneladas en 1978 a 43 millones de toneladas en 2018-2019 (Singh y col., 2021). Esto resulta ser un incremento significativo de 43 veces, incluso más que el aumento de la población mundial en el mismo periodo (1,7 veces).

Además, la actividad industrial de hongos cultivados de especies silvestres, comestibles y medicinales generó ingresos por más de 63 mil millones de dólares estadounidenses en 2013. De estos, los hongos comestibles contribuyeron con el 54%, los medicinales con un 38% y los silvestres con un 8% del total (Sánchez y col., 2017).

Los principales países productores de hongos comestibles a nivel mundial son China, con aproximadamente el 80% de la producción, siendo el líder desde hace años (Muslimin y col., 2021); le siguen Japón, Corea del Sur, Estados Unidos, la Unión Europea, Canadá y Australia (Singh y col., 2021). En contraste, los países latinoamericanos y africanos tienen una producción mucho menor, lo que refleja la desigualdad en el crecimiento y desarrollo reciente de esta actividad entre los países (Jaramillo Mejía y col., 2014).

El cultivo de hongos tiene un gran potencial para convertirse en una actividad rentable que genera beneficios económicos a los países latinoamericanos, como la Argentina. Esto se debe a que se pueden producir grandes volúmenes en poco espacio, tiene bajo costo de inversión inicial, rapidez en el recupero del capital invertido y producción anual con variables controladas. Además, el precio de venta es relativamente alto, hay demanda creciente y se pueden usar residuos agropecuarios e industriales como sustrato (González Matute y col., 2008).

Según la tendencia observada a lo largo de estos años, existen grandes probabilidades de que la producción y comercialización de hongos comestibles se incrementen a nivel mundial y latinoamericano (González Matute y col., 2008). Esto representa una opción con el potencial para contribuir positivamente en el desarrollo económico y social, mejorando la alimentación y nutrición de la población, la salud, la agricultura y la biorremediación (Andrade Gallegos y col., 2012).

1.4.4 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL FÍLUM BASIDIOMYCOTA

Los hongos pertenecientes al fílum Basidiomycota se caracterizan porque su parte comestible, conocida como seta, se compone de un sombrero y un pie. La seta es la estructura reproductora que contiene los basidios y las esporas necesarias para la reproducción. Estas setas son variadas en formas y tamaños y, además, son ricas en vitaminas, minerales y otros nutrientes. La parte no visible del hongo, o subterránea, se denomina micelio y es la responsable de absorber los nutrientes orgánicos del sustrato.

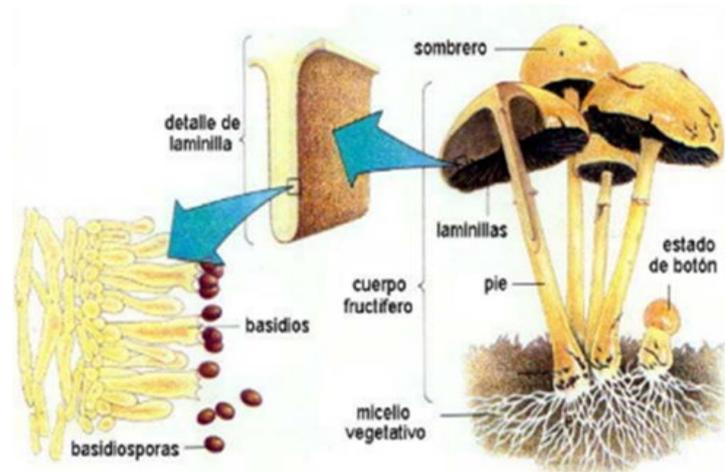


Figura N° 5: Estructura general de los hongos pertenecientes al fílum Basidiomycota. Fuente: Suarez Arango y col., 2010.

Un pequeño grupo de basidiomicetos desempeña una actividad muy importante: la descomposición de la madera, papel y otros productos naturales. Estos hongos producen celulasas y enzimas que catabolizan la lignina y la usan como fuente de carbono y energía (Sierra Salas y col., 2014).

Este pequeño grupo de hongos basidiomiceto producen la llamada podredumbre de la madera (Suarez Arango y otros, 2010). Existen diferentes tipos de clasificación según la podredumbre que generan, pero los más conocidos son: Hongos de producción blanda, hongos de producción oscura y hongos de producción blanca (Mata y col., 2017).



Figura N° 6 (Izquierda): Imagen de *Ganoderma lucidum* perteneciente al fílum Basidiomycota. Fuente: Ibarra Islas y col. (2019).

Figura N° 7 (Derecha): *Lentinula edodes*. Ejemplos de especies pertenecientes al fílum Basidiomycota. Fuente: Ibarra Islas y col. (2019).

1.4.5 CULTIVO DE PLEUROTUS OSTREATUS

Los hongos del género *Pleurotus* spp. son basidiomicetos cuyos basidiomas se presentan en forma de abanico o embudo, con sombreros de distintos colores (desde blanco, crema, café claro y oscuro, hasta grisáceo y rosa anaranjado) y un pie o "estípite" que puede estar ausente o manifestarse lateralmente. Estos hongos se clasifican como saprófitos de pudrición blanca, ya que descomponen y extraen nutrientes de sustratos como troncos, ramas, árboles muertos y raíces podridas; transformando y degradando los diferentes polímeros lignocelulósicos que da como resultado un material de apariencia esponjosa, fibrosa y de coloración blanquecina (Belletini y col., 2015; Salomones y col., 2017; Mata y col., 2017).



Figura N° 8: Micelio del hongo Pleurotus ostreatus que adopta coloración blanquecina sobre el sustrato que degrada. Fuente: Quispe Vargas y col., (2021).

El género *Pleurotus*, conocido como "Setas", está compuesto por al menos 70 especies, de las cuales 12 son cultivadas (Salomones y col., 2017). La especie más importante y producida es el *Pleurotus Ostreatus*, comúnmente llamado "hongos ostra", "Orellana" o "hongo oreja" (Garzón Gómez y col., 2008; Belletini y col., 2015). La producción de esta especie se ha visto incrementada en las últimas décadas, siendo mayormente cultivada en China (Belletini y col., 2015).

La especie se caracteriza por poseer píleos o sombreros de colores variables desde gris claro hasta café grisáceo y por tener la capacidad de convertir subproductos o desechos agrícolas, como la lignina y la celulosa, en alimento para los seres humanos con excelentes propiedades nutritivas, medicinales, gusto y sabor (Salomones y col., 2017). Además, tiene potencial en aplicaciones biotecnológicas y ambientales, prospera en un amplio rango de temperaturas y humedad, menor tiempo de cultivo y bajos controles ambientales y no es frecuentemente atacado por plagas o enfermedades (Piña Guzmán y col., 2015).



Figura N° 9: Variabilidad de colores observados en los sombreros de genero *Pleurotus* spp. Fuente: Salomones y col, (2017).

Desde los años 80', el cultivo de *Pleurotus ostreatus* se ha expandido en Latinoamérica, particularmente en Argentina. Comenzó en las provincias de Río Negro y Neuquén, inicialmente sobre troncos de pinos y árboles, y posteriormente, en los años 90', en bolsas sobre sustrato de paja de trigo (Quispe Vargas y col., 2021).



Figura N° 10: Imagen del sombrero en forma de ostra u oreja del hongo *Pleurotus ostreatus*. Fuente: Shen, 2017.

1.4.6 ETAPAS DEL CULTIVO DE HONGOS PLEUROTUS

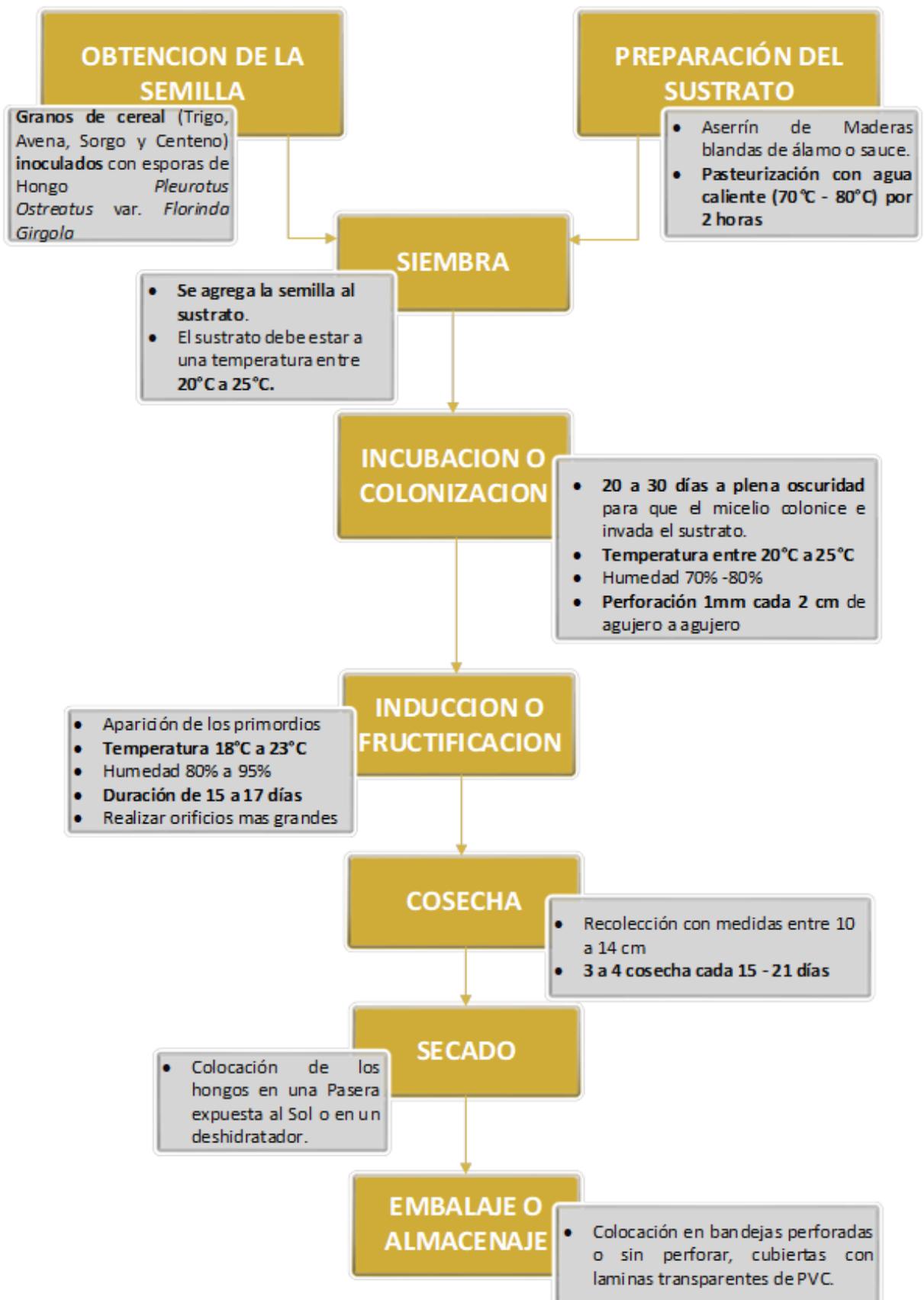


Figura N° 11: Etapas de la producción del Hongo *Pleurotus Ostreatus*. Elaboración propia basado en Jaramillo Mejía, 2014. & Quispe Vargas, 2021.

El sustrato adecuado para el cultivo del hongo *Pleurotus Ostreatus* debe cumplir con ciertas características físico-químicas, como un tamaño de 5 a 15 cm, un pH de 6,0 - 6,5, buena disponibilidad en cantidad y continuidad, homogeneidad, precio accesible, locación cercana y fácil acceso (Piña Guzmán y col., 2015).



Figura N° 12: Sustratos utilizados para el cultivo del Hongo Pleurotus Ostreatus. Fuente: Quispe Vargas, 2021.

Esta etapa involucra no solo la elección adecuada de los materiales que conforman el sustrato, sino también tratamientos térmicos o químicos para garantizar la desinfección del sustrato, lo cual asegura la eliminación de los competidores de la seta y permite que esta crezca adecuadamente (Moreno y col., 2017). Entre los tratamientos más empleados se encuentran:

- Pasteurización por vapor: Implica inyectar vapor al sustrato a una temperatura de 60°C–100°C durante 1 a 2 horas. Resulta ser el método de desinfección más empleado en los procesos de los hongos comestibles comerciales (Jaramillo Mejía y col, 2014).
- Pasteurización en Agua: El sustrato a utilizar se coloca en tambores que contengan agua caliente entre 70°C a 80°C y se mantiene sumergida en esta por 1 a 2 horas. Este método requiere de mantener la temperatura constante y por ende de una fuente de energía confiable y constante que permita regular su intensidad (Quispe Vargas y col, 2021).
- Esterilización: Esta técnica consiste en colocar las bolsas de polipropileno con microporos llenas con medio de cultivo y colocarlas en una autoclave a una temperatura de 121°C durante 2 horas, para luego de esto dejarlo enfriar en un cuarto frío y totalmente aséptico (Shen, 2017).

Hay que destacar que para la pasteurización (vapor y agua) y la esterilización se utilizan como fuentes de energía el gas doméstico, el GLP y/o la leña en calentadores o calderas (Pincheira Garcés y col., 2014). Incluso, según Shen y col. (2017), también se utiliza la energía solar como método de calentamiento del agua, lo cual es una vía económica y no contaminante.

1.5 ENERGÍA

La energía es la capacidad de un cuerpo para realizar trabajo. Esto puede manifestarse en la forma de trabajo mecánico, generación de calor, emisión de luz, etc. (Schallenberg Rodríguez, 2008). Existen diversas formas de energía como térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química, nuclear, etc., las cuales suman para conformar la energía total o (E) de un sistema (Çengel y col. 2011). La unidad estándar para medir la energía según el sistema internacional (S.I.) es el Joule [J]. La energía se puede transferir únicamente mediante las interacciones de trabajo y/o calor.

La Termodinámica estudia las interacciones entre sistemas y el medio que los rodea, las cuales pueden manifestarse como trabajo o calor. Según Incropera y col. (1999), el calor se define como "la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas (o entre un sistema y el exterior) debido a una diferencia de temperatura". La Termodinámica trata los estados finales del proceso durante el cual ocurre una interacción, pero no proporciona información acerca del valor absoluto de la energía total (E) de un sistema, sólo trata con el cambio que se produce de la misma (Çengel y col. 2011).

1.5.1 TRASFERENCIA DE CALOR

Se refiere al intercambio de energía entre dos cuerpos a diferentes temperaturas (Incropera y col., 1999). Esta transferencia no puede ocurrir si ambos sistemas se encuentran a la misma temperatura. Esta transferencia actúa mediante tres mecanismos básicos: conducción, convección y radiación (Larco Dávalos y col.2014).

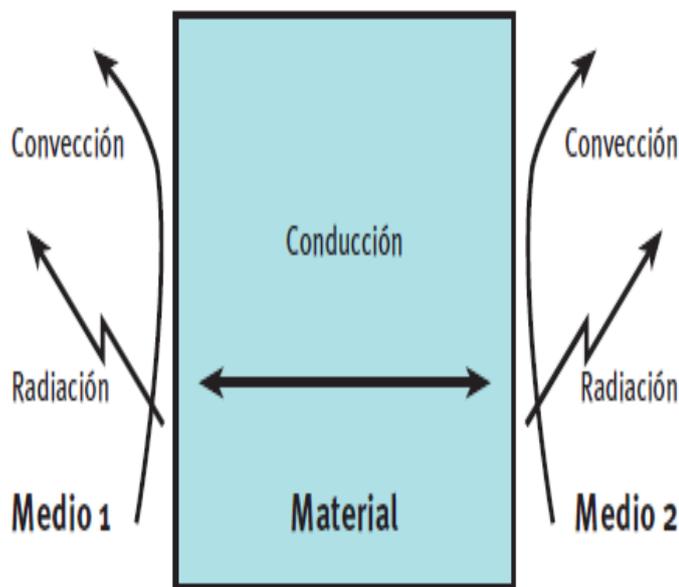


Figura N° 13: Representación esquemática de los mecanismos de transferencia de calor. Fuente: IDEA, 2007.

Conducción

Es un mecanismo de transmisión de energía calórica mediante difusión o contacto directo entre dos cuerpos que se haya a distintas temperaturas (Larco Dávalos y col.2014). Este proceso se da mediante un choque o acoplamiento de moléculas del sistema (Fabara Peralvo, 2020).

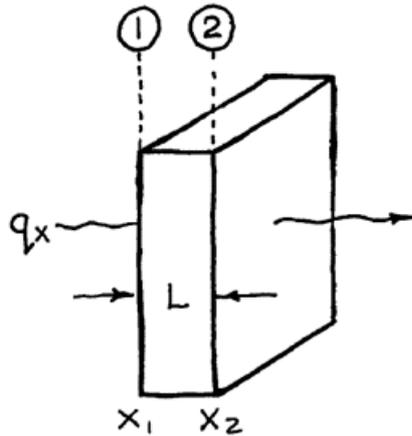


Figura N° 14: Mecanismo de conducción a través de un sólido o fluido estacionario. Fuente: Levenspiel, 1998.

En general, este proceso está regido por la "Ley de Fourier", donde el flujo de calor depende de la naturaleza del material y de la temperatura a la que se encuentre, siempre que esté en estado estacionario (Larco Dávalos y col. 2014). La ecuación de Fourier se define entonces como:

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx}$$

Donde:

q_x : Flujo de calor en la dirección x (W)

k : Conductividad térmica (W/m*K)

A : Área normal en dirección al flujo de calor (m²)

dT : Diferencial de temperatura en la dirección x (K)

dx : Diferencial de posición en la dirección x (m) (espesor)

La presencia del signo negativo en la ecuación indica que el calor fluye de mayor a menor temperatura de acuerdo a la segunda ley de la termodinámica (Larco Dávalos y col., 2014). La conductividad térmica (k) es una propiedad de transporte que se expresa en (W/m*K) (Incropera, 1999) y varía para cada material.

Tabla N° 1: Conductividades térmicas (k) para diferentes materiales a temperatura ambiente (300 K). Fuente: Çengel y col. 2011 & Thibault, 2010.

Material	k (W/m*K)	Material	k (W/m*K)
Sólidos		Gases	
Acero	45	Biogás (CH ₄ , CO ₂ y otros)	0,026
Aluminio	204	Vapor de agua (H ₂ O)	0,025
Cobre	380	CO ₂	0,018
Plomo	34	SO ₂	0,009
Fibra de Vidrio	0,036	CH ₄	0,030
Espuma de Poliestireno	0,040	Líquidos	
Poliuretano Expandido	0,023	Agua (H ₂ O)	0,61
Poliétileno (PET)	0,5	Mercurio	8,1

Convección

Según Fabara Peralvo (2020), la convección es un método de transferencia de calor mediante el movimiento físico de las moléculas desde el punto de mayor temperatura al de menor temperatura. Esta transferencia se produce en los fluidos gaseosos y líquidos (IDAE, 2007). Existen dos tipos de convección, **forzada** y **natural**.

- **Convección Forzada:** Este modo de transferencia de calor se manifiesta cuando un fluido atraviesa un sistema debido a la acción de un agente externo como un agitador mecánico (ventilador, bomba) o una diferencia de presión externamente impuesta (agentes meteorológicos) (Larco Dávalos y col.2014).
- **Convección Natural:** Movimiento o flujo provocado por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidad generadas por variaciones de temperatura en el fluido. Esto lleva a que se genere un mezclado del fluido (Incropera, 1999).

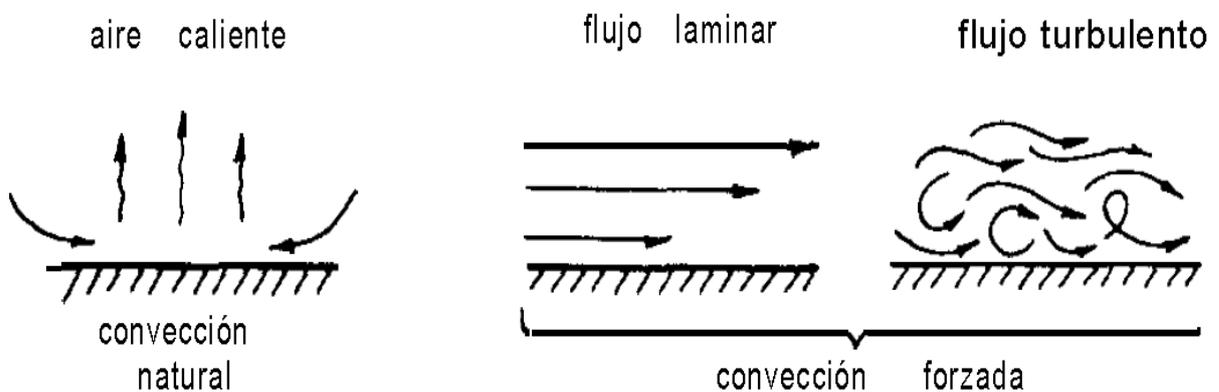


Figura N° 15: Mecanismos de transferencia de calor por convección. Fuente: Levenspiel, 1998.

En general, para describir el flujo de transferencia de calor por convección (forzada y natural), se emplea la "Ley de Enfriamiento de Newton" (Larco Dávalos y col., 2014). Esta ley incluye una constante de proporcionalidad (h) conocida como el coeficiente de transferencia de calor por convección. Depende de las condiciones de la capa límite, donde influyen la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas del fluido y del transporte. Se expresa en $W/m^2 \cdot K$ (Incropera, 1999).

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_{\text{fluido}})$$

Donde:

- h : Coeficiente de transferencia de calor ($W/m^2 \cdot K$)
- A : Área de transferencia de calor por convección (m^2)
- T_s : Temperatura de la Superficie (K)
- T_{fluido} : Temperatura del fluido (K)
- q : Flujo de calor (W)

Tabla N° 2: Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección. Fuente: Larco Dávalos y col.2014.

TIPOS DE CONVECCIÓN	h (W/m ² * K)
Convección Libre de gases	2-25
Convección libre de Líquidos	10-100
Convección Forzada de gases	25-250
Convección Forzada de líquidos	50-20.000
Ebullición y Condensación	2.500-10.0000

Al momento de calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección (h), en muchos casos se emplea el número de Nusselt (Nu). Este es un parámetro adimensional formado por h y k, que son el coeficiente de convección y la conductividad térmica del fluido, y L, una longitud característica. Para obtener el número de Nusselt, se emplean otros parámetros adimensionales como el Número de Reynolds (Re) y el Número de Prandtl (Pr), entre otros (Martínez, 1992).

$$Nu = \frac{hL}{k}$$

Radiación

La radiación es la transferencia de calor de una superficie caliente a otra fría a través del aire o el vacío. La energía calorífica se transfiere mediante radiación electromagnética. Todos los cuerpos (sólidos, líquidos y gaseosos) emiten radiación térmica que se propaga en forma de ondas electromagnéticas y son absorbidas por un cuerpo externo, lo que aumenta su temperatura (Fabara Peralvo, 2020). Esta transferencia de calor entre las superficies no requiere de un medio material entre ellas, por lo tanto, se produce incluso en el vacío (IDAE, 2007).

Comúnmente se encuentran dos términos cuando se habla de la transferencia de calor radiante:

- **Emitancia o emisividad (ϵ):** Se refiere a la capacidad de un material para emitir energía radiante a través de su superficie. Todos los materiales tienen un grado de emisividad que va desde cero hasta uno ($0 \leq \epsilon \leq 1$); cuanto más bajo sea este grado, menor será el calor que irradia la superficie. De acuerdo con Incropera (1999), esta propiedad permite medir la eficiencia con la cual una superficie real emite energía a una temperatura dada en comparación con un cuerpo negro ideal a la misma temperatura, dependiendo marcadamente de las características y propiedades del material.
- **Reflectancia o reflectividad:** Se refiere a la fracción de energía radiante entrante que se refleja de una superficie.

La radiación térmica está regida por la Ley de Stefan-Boltzmann, la cual establece que el flujo de energía emitido por un cuerpo ideal de radiación (cuerpo negro) es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta (Larco Dávalos y col.2014).

$$q_{rad} = \sigma AT^4$$

Donde:

q_{rad} : Flujo de calor (W)

σ : Constante de Stefan Boltzmann $5,67 \cdot 10^{-8}$ (W/m²K⁴)

T^4 : Temperatura el cuerpo elevado a la cuarta potencia

A : Área del cuerpo emisor (m²)

No obstante, el flujo de calor emitido por una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura, por lo que el cálculo en este caso está basado en la Ley de Stefan-Boltzmann, pero se le añade al cálculo el coeficiente de emisividad (ϵ), quedando de la siguiente manera.

$$q_{rad} = \sigma A\epsilon T^4$$

Donde:

q_{rad} : Flujo de calor (W)

ϵ : Emisividad de un cuerpo. ($0 \leq \epsilon \leq 1$)

σ : Constante de Stefan Boltzmann $5,67 \cdot 10^{-8}$ (W/m²*K⁴)

T^4 : Temperatura el cuerpo elevado a la cuarta potencia

A : Área del cuerpo emisor (m²)

Tabla N° 3: Coeficientes de emisividad (ϵ) para diferentes materiales a temperatura ambiente (300 K).
Fuente: Levenspiel, 1998.

Material	Emisividad (300 K)
Acero inoxidable # 301 pulido	0,37
Agua	0,96
Aluminio, laminado brillante	0,1 – 0,3
Asfalto	0,90 - 0,98
Concreto	0,85 - 0,95
Fibra de vidrio	0,8 - 0,90
Ladrillo Rojo	0,93
Madera	0,90
Pintura Negra Mate	0,97
Plásticos (PE, PP, PVC) ⁵	0,94
Plata	0,12
Zinc blanco (Pintura)	0,95

1.5.2 ENERGÍAS CONVENCIONALES Y ENERGÍAS RENOVABLES

Los tipos de recursos energéticos empleados por la humanidad se pueden clasificar según su fuente, de la siguiente manera.

⁵ <http://www.academiatesto.com.ar/cms/tablas-de-emisividad>

- **Fuentes de energías no renovables:** Aquellas provenientes de recursos finitos y limitados como el petróleo, el carbón y el gas; que existen en cantidades y reservas que son agotables a la escala humana, según la tasa de uso actual. Hay que destacar que la utilización en la generación de energía tiene repercusiones importantes para el medioambiente, como la contaminación ambiental, el cambio climático y el impacto negativo en el desarrollo sostenible (Schallenberg Rodríguez, 2008; Gavilánez y col., 2020).

- **Fuentes de energías renovables:** Las fuentes de energía renovables son aquellas que se obtienen de los recursos naturales como el sol, el agua y el viento, cuya tasa de regeneración es mayor a la de uso. Estas energías son inagotables a escala humana y se pueden generar de manera permanente. Entre las principales fuentes de energías renovables están la energía solar, la biomasa, el biogás, la hidráulica, la eólica, la geotérmica y las marinas. A excepción de la energía geotérmica y marina, el resto de las fuentes de energía renovables provienen directa o indirectamente de la energía suministrada por el sol (Gavilánez y col., 2020).

1.6 BIOGÁS

1.6.1 DIGESTIÓN ANAERÓBICA

La digestión anaerobia, también conocida como "biodigestión", es un proceso biológico complejo y degradativo, mediante el cual la biomasa se degrada y trata por microorganismos en ausencia de oxígeno, es decir, bajo condiciones anaeróbicas. Como resultado de este proceso se obtienen por un lado "Biogás" y por el otro, productos sólidos y líquidos llamados "digestato" y "biol", ambos ricos en nutrientes y útiles para la fertilización y abono (Lorenzo Acosta y col., 2005; Catalán Marín y col., 2017).

El biogás está compuesto por una mezcla de gases cuya composición varía dependiendo de los materiales que se usan para su producción y de las operaciones llevadas a cabo en los biodigestores. En promedio, se estima que el biogás está compuesto en un 50%-65% de metano (CH₄), 25%-45% de dióxido de carbono (CO₂) y cantidades pequeñas de otros elementos como nitrógeno (N₂), vapor de agua (H₂O), hidrógeno (H₂) y sulfuro de hidrógeno (SH₂) (Ver tabla N°4). Este último elemento es de suma importancia tenerlo en consideración ya que requiere de ser removido del mismo, en mayor o en menor medida dependiendo del uso final, ya que es un gas que provoca deterioro en los equipos por procesos corrosivos. Además, es altamente tóxico y fácilmente distinguible por su característico olor a huevo podrido (Rodríguez Venandy y col., 2012).

Tabla N° 4: Composición del Biogás. Fuente: Solano Galvis, 2018.

COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS	
Metano (CH ₄)	50-65%
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25-45%
Nitrógeno (N ₂)	1-5%
Vapor de Agua (H ₂ O)	1-2%
Otros (H ₂ , CO, H ₂ S y O ₂)	≤ 1%

1.6.2 ETAPAS DE LA BIODIGESTIÓN

Como se ha mencionado, la biodigestión es un proceso complejo que requiere condiciones anaerobias y depende de la acción coordinada de una variedad de microorganismos en distintas etapas para convertir la materia orgánica en biogás. Las etapas que forman la biodigestión son la hidrólisis, la acidogénesis, la acetogénesis y la metanogénesis (Constáble y col, 2019).

HIDRÓLISIS

Es el primer paso de una digestión anaeróbica en la que las moléculas complejas insolubles, como carbohidratos, proteínas y lípidos, son hidrolizadas por enzimas extracelulares de los microorganismos hidrolíticos a moléculas orgánicas más sencillas y solubles, como azúcares simples, aminoácidos y ácidos grasos (Carhuancho León y col., 2012).

ACIDOGÉNESIS

Durante esta etapa, tiene lugar la fermentación de moléculas orgánicas sencillas y solubles por microorganismos fermentativos o acidogénicos, generando como resultados ácidos orgánicos (acético, fórmico, propiónico, butírico, láctico y etanol) y H₂. Estos microorganismos son importantes ya que proporcionan alimento a los grupos de bacterias que actúan posteriormente y eliminan cualquier traza de oxígeno disuelto en el sistema (Constáble y col., 2019).

ACETOGÉNESIS

Es la tercera etapa de la digestión anaeróbica, conocida como "acidogénesis intermedia". En esta etapa, los productos de fermentación (ácidos orgánicos, alcoholes) se transforman en hidrógeno (H₂), dióxido de carbono (CO₂) y ácido acético (CH₃COOH).

Es importante mantener controlada la concentración de hidrógeno generada por la misma acción de las acetogénicas, que resulta tóxico para las mismas al producir que la reacción vaya hacia el lado de los reactivos y no de los productos. Esto genera una acumulación de ácidos, disminución de pH y, por lo tanto, inhibición del proceso, principalmente al afectar a las bacterias metanogénicas de la etapa siguiente (Catalán Marín y col., 2017).

METANOGENESIS

La cuarta y última etapa, donde el metano (CH₄) es producido a partir del ácido acético y a partir de H₂ y CO₂, así como también a partir de otros sustratos como el ácido fórmico y el metanol. Esta etapa está conformada por un amplio grupo de archeas anaeróbicas estrictas conocidas como "Metanogénicas", las cuales son responsables de la formación de metano y de la eliminación de los productos anteriores del medio. Éstas son muy sensibles a las condiciones ambientales del medio, por lo que varios investigadores evalúan el desempeño de un sistema anaeróbico en función de la tasa de producción de metano. Esto se debe a que se considera la metanogénesis como un paso limitante del proceso (Lorenzo Acosta y col., 2005; FAO, 2011).

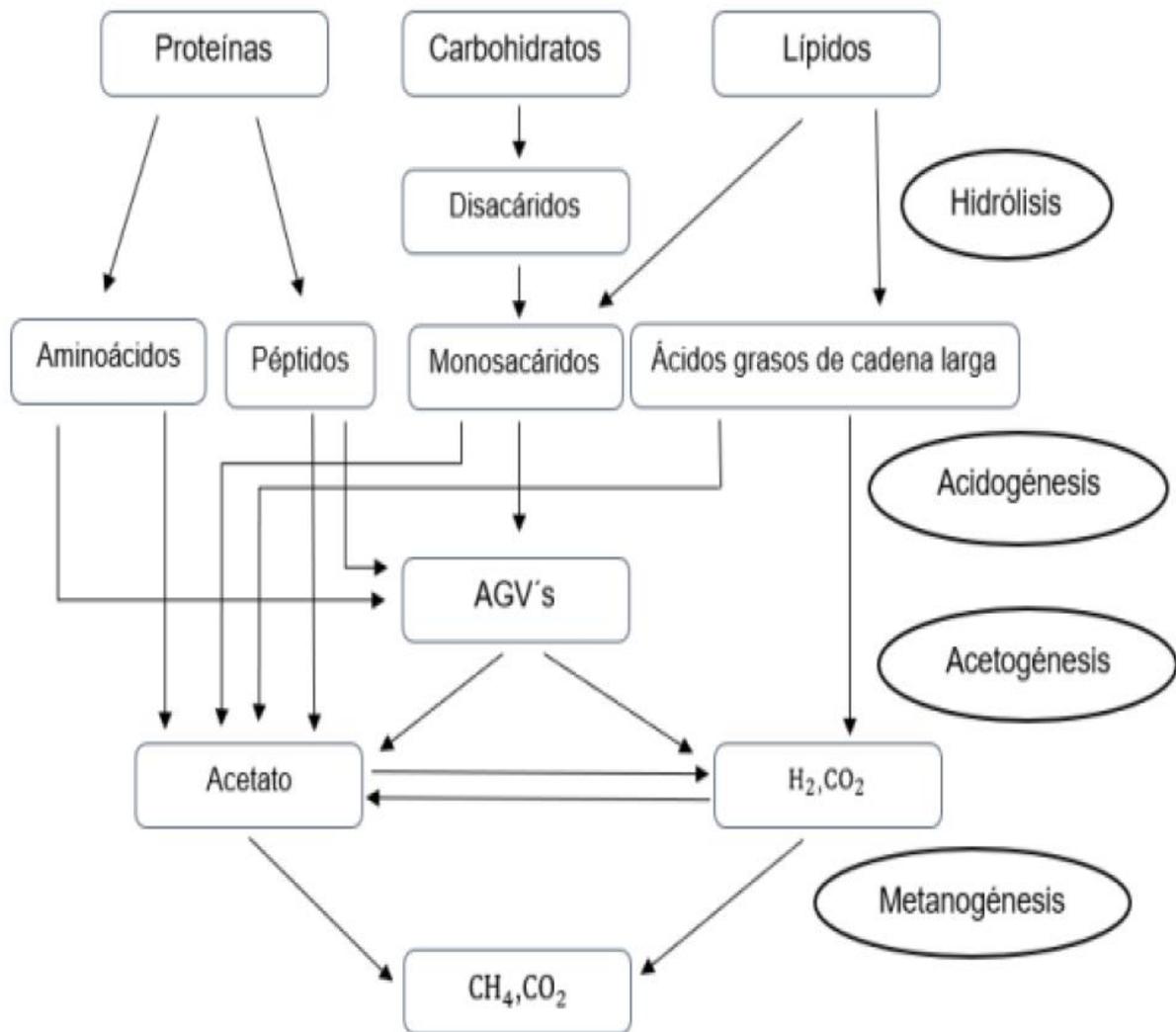


Figura N° 16: Etapas de la digestión anaeróbica y reacciones químicas involucradas. Fuente: Li, Chun y Wu (2019).

1.6.3 FACTORES Y PARAMETROS FISICO-QUIMICOS DE LA BIODIGESTION

Los microorganismos de la biodigestión, especialmente los metanogénicas, son sensibles a los cambios del ambiente. Por ello, la digestión anaeróbica es un proceso lento y sensible a las condiciones del medio. Para mantener los parámetros y factores óptimos se deben controlar variables como el tipo de sustrato o materias primas, temperatura, pH, relación Carbono/Nitrógeno, toxicidad y la agitación de la digestión (Ajay y col., 2021).

Tipo de sustrato

La producción de biogás requiere de diferentes tipos de materias que conforman lo que se denomina como biomasa. Dicha biomasa es aquella materia orgánica que se genera como consecuencia de la producción, uso y consumo en cualquier actividad. Los diferentes tipos de biomasa son los de origen vegetal, animal, agroindustrial, forestal, doméstico. Cada uno de estos tipos de biomasa posee una parte residual conformando lo que se conoce como "biomasa residual" (Huaytalla Galindo y col., 2019).

Tabla N° 5: Tipos de biomasa residual. Fuente: Varnero y Arellano, 1991 citado en FAO, 2011.

Residuos de origen animal	estiércol, orina, guano, camas, residuos de mataderos (sangre y otros), residuos de pescados.
Residuos de origen vegetal	malezas, rastrojos de cosechas, pajas, forraje en mal estado.
Residuos de origen humano	heces, basura, orina.
Residuos agroindustriales	salvado de arroz, orujos, cosetas, melazas, residuos de semillas.
Residuos forestales	hojas, vástagos, ramas y cortezas.
Residuos de cultivos acuáticos	algas marinas, jacintos y malezas acuáticas.

Las materias primas para la producción de biogás generalmente están compuestas por Carbono (C) y Nitrógeno (N) en mayores proporciones, y otros elementos traza como Azufre (S), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Hierro (Fe) y Sodio (Na) en proporciones menores. Estos elementos son necesarios para el desarrollo y la actividad de la microbiota anaeróbica, y suficientes en estiércoles, lodos cloacales y otros residuos orgánicos (Carhuancho León y col., 2012).

La degradación de los estiércoles animales depende fundamentalmente del tipo de animal y la alimentación que hayan recibido, generando diferencias notables en los valores de producción y rendimiento de biogás. Según Hilbert y col. (2011), el volumen de estiércol producido por distintas especies de animales es variable en función del peso, tipo de alimentación y manejo de los mismos.

Tabla N° 6: Volumen de estiércol producido y potencial de rendimiento por especie. Fuente: Hilbert y col., 2011.

Especie	Peso vivo(kg)	Kg estiércol/día
Vacunos	400	25 - 40
Equinos	450	12 - 16
Cerdos	50	4,5 - 6
Ovinos	45	2,5
Aves	1,5	0,06
Caprinos	40	1,5

Las materias primas utilizables para la biodigestión varían en su contenido de agua, compuestos orgánicos y elementos trazas según el tipo de residuo. Según la FAO y col. (2011), los residuos orgánicos presentan un contenido de agua que oscila entre 10 a 90% del peso fresco, además de una composición orgánica que suponen un 50% del peso fresco. Estos se constituyen principalmente por carbohidratos (que representan en promedio el 50% de la materia orgánica seca), compuestos nitrogenados, lignina (10-40%) y otras fracciones como cera, resinas y grasas. Por otra parte, la composición química de la materia orgánica seca promedio es del 48%C, 44%O, 7%H, 2%N y elementos trazas del orden de 1 a 10% del peso seco (FAO y col., 2011).

Tabla N° 7: Grupos orgánicos de los residuos vegetal y animal (Valores promedios, en base seca).
Fuente: FAO, 2011.

Materia Prima	Lípidos (%)	Proteínas (%)	Celulosa Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Ceniza (%)
Paja de trigo	1,10	2,10	65,45	21,60	3,53
Paja de centeno	9,62	5,42	59,95	12,70	12,31
Paja de arroz	2,35	12,26	30,51	10,61	12,55
Poroto verde	3,80	11,04	39,61	13,84	9,14
Pasto verde	8,05	4,94	57,22	9,80	19,99
Alfalfa	10,41	12,81	36,79	8,95	10,30
Hojas secas	4,01	3,47	32,78	29,66	4,68
Caña maíz		4,50	35,40	10,30	6,50
Bovino	3,23	9,05	32,49	35,57	19,66
Porcino	11,50	10,95	32,39	21,49	23,67
Aves	2,84	9,56	50,55	19,82	17,23
Equino	2,70	5,00	40,50	35,00	17,80
Ovino	6,30	3,75	32,00	32,00	25,95
Caprino	2,90	4,70	34,00	33,00	26,40

Sólidos Totales (ST) y volátiles (SV)

Los sólidos totales (ST) o materia seca (MS) representan la cantidad de materia que queda tras someter una muestra fresca a una temperatura de 105,5 °C (\pm 2°C) hasta alcanzar un peso constante y extraer el agua que contiene (FAO, 2019). Estos están compuestos por una fracción inorgánica, la cual corresponde a los sólidos inertes, y una fracción orgánica, que son los sólidos volátiles (Martí Herrero y col., 2020).

Los sólidos volátiles (SV) u orgánicos son la porción de sólidos totales que se libera de una muestra sustrato durante su exposición a una mufla a 600°C durante dos (2) horas, y se espera su conversión a biogás durante la biodigestión. Estos sólidos volátiles se expresan como un porcentaje respecto a los sólidos totales (% de ST) o bien como un porcentaje de la materia orgánica sin secar o en base húmeda (% en base húmeda) (FAO, 2019) En rigor, la determinación de SV no distingue con precisión los sólidos orgánicos de los inorgánicos, ya que al producirse la combustión existen también proceso de pérdida de materia por volatilización de algunas sales minerales, e incluso también existe algún aporte de materia por la combinación del O₂ atmosférico en la formación de los óxidos sólidos que constituyen las cenizas.

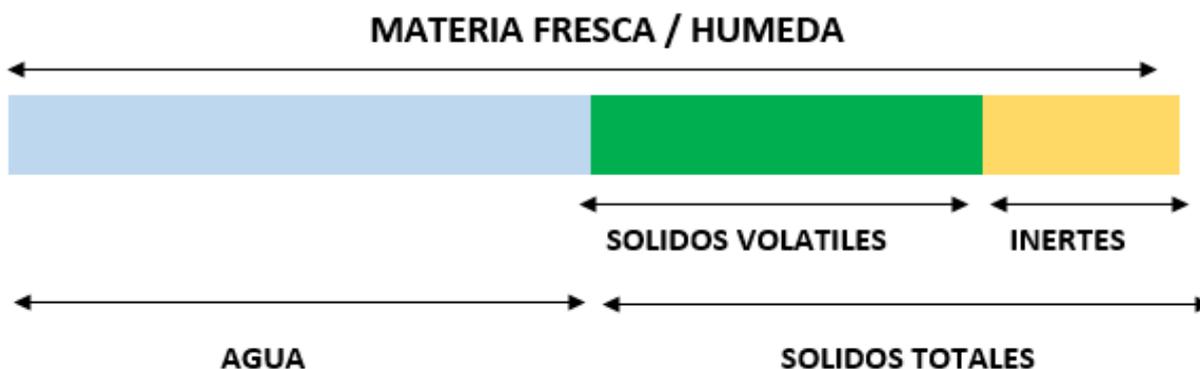


Figura N° 17: Representación de sólidos totales y volátiles en una muestra de sustrato. Fuente de elaboración propia, 2022.

Los residuos de animales pueden tener un contenido de Materia Seca (MS) o Sólidos Totales (ST) superior al 10% de la mezcla agua-estiércol. Según los requerimientos operacionales para un reactor anaerobio agitado de mezcla completa, el contenido de ST no debe exceder el 10% de la mezcla-agua estiércol (FAO, 2019), por lo que los residuos de granja deben ser diluidos previamente al tratamiento.

Relación carbono/ nitrógeno (C/N)

Otro parámetro de la relación Carbono/Nitrógeno (C/N) es muy importante para conocer el comportamiento de un sustrato orgánico, debido a que expresa la proporción de estos elementos claves e indispensables para la vida. Los microorganismos consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima para un material "fresco o crudo" es de 30 unidades de carbono por una unidad de nitrógeno ($C/N = 30/1$), con un rango aceptable entre 20:1 y 40:1, expresado en base seca. Sin embargo, cuando la relación es muy estrecha (10:1) se produce intoxicación por exceso de producción de Amoniaco (NH_3) y si es muy amplia (mayor a 40:1) se inhibe el crecimiento debido a falta de nitrógeno (Carhuancho León y col., 2012; FAO y col., 2019).

Cada tipo de sustrato presenta una relación C/N distinta; el guano de gallina, por ejemplo, tiende a tener una relación muy baja debido a su alto contenido de nitrógeno, mientras que la paja de trigo posee una relación demasiado alta debido a la escasez de nitrógeno (FAO y col., 2019). La descomposición de materiales con un alto contenido de carbono, superior a 35:1, es más lenta debido a la falta de nitrógeno que impide la multiplicación y desarrollo de bacterias. Sin embargo, esto se compensa con un periodo de producción de biogás más prolongado (FAO y col., 2019).

Codigestión

La codigestión de sustratos de biomasa residual se ha convertido en una herramienta de gran importancia para la producción de biogás de manera eficiente, tal como lo afirma Briseño y col. (2017) "La codigestión es una solución para la obtención de una mayor producción de biogás, a través de la mezcla de diferentes sustratos con potencialidad de utilizarse en la digestión anaeróbica". Esta herramienta permite tener un impacto benéfico en el microbiota de los biodigestores, lo que a su vez resulta en una mayor producción de biogás. Además, el proceso de codigestión ayuda a diluir compuestos tóxicos o inhibidores, equilibrar nutrientes, aumentar la carga de materia orgánica biodegradable, generar niveles más favorables de humedad, alcalinidad y relación carbono/nitrógeno.

Temperatura

Un factor básico y fundamental para el proceso de biodigestión es la temperatura porque influye de forma decisiva en el proceso anaeróbico (Lorenzo Acosta y col., 2005). Dicho factor determina:

- La velocidad con la que ocurren las reacciones químicas dentro del biodigestor al afectar la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados y de las reacciones químicas en general.
- La composición del biogás, debido a la dependencia que tiene la solubilidad de los diferentes gases con la temperatura.

- El daño que pueda causar a los microorganismos presentes en el medio después de ciertos valores de ésta.

La actividad biológica de los microorganismos depende directamente de la temperatura, ya que según indica la FAO (2011), "para garantizar un óptimo funcionamiento del digestor, se recomienda que el tratamiento anaeróbico se diseñe para que opere con variaciones de temperatura que no excedan los 0,6 – 1,2 °C /día".

Existen cuatro grupos de microorganismos según las temperaturas óptimas del proceso, que se los clasifica en psicrófilos, mesófilos, termófilos e hipertermófilos (Catalán Marín y col., 2017).

*Tabla N° 8: Clasificación de los microorganismos según su rango de temperatura de operación.
Fuente: Guisasola, 2022.*

Al evaluar el rango de temperatura óptimo para el funcionamiento del biodigestor, se deben tomar en cuenta todos los factores mencionados anteriormente. De acuerdo con Carhuancho León y col. (2012), la eficiencia y producción de biogás aumenta con el incremento de la temperatura, sin embargo, también se incrementan los costos de instalación y operación. Por lo tanto, se deben analizar y evaluar todas estas consideraciones para determinar el rango de temperatura adecuado para el biodigestor.

GRUPO DE BACTERIAS	RANGO DE TEMPERATURAS (°C)
Psicrófilos	5-25
Mesófilos	30-35
Termófilos	50-60
Hipertermófilos	> 65

Como es posible observar en la tabla N°8, el incremento del rango de temperatura produce un aumento en la tasa de hidrólisis, en la velocidad de crecimiento bacteriano y, por lo tanto, en la velocidad de producción de biogás. Lo anteriormente mencionado genera que se incremente el tratamiento de los materiales, por unidad de tiempo, con lo cual se requiere de un menor Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) para el sistema, posibilitando así la construcción de digestores de menores dimensiones y por lo tanto bajando el nivel de inversión. También disminuye la viscosidad, lo que permite un menor consumo energético en el bombeo y en la agitación. El rango termófilo se asegura la destrucción de patógenos, la eliminación de malas hierbas y de huevos y larvas de insectos, por lo cual presenta interés para el tratamiento de residuos que luego han de ser aplicados a suelos y cultivos, que requieran un cierto grado de higienización (Reynoso, M., 2017).

Sin embargo, hay que tener en cuenta que los biodigestores que trabajan en rangos termofílicos son más sensibles e inestables frente a pequeñas variaciones del proceso o del sustrato, llegando incluso a inhibir la biodigestión (FAO y col., 2019). Esto se debe a que se incrementa la solubilidad de la materia orgánica, lo cual además de ser benéfico para el proceso, también incrementa la solubilidad de los compuestos tóxicos. Por esta razón, el régimen mesofílico de operación es más empleado que el régimen termofílico de operación en los biodigestores (FAO y col., 2019). Además, hay que considerar que los sistemas

termófilos tienen una mayor demanda energética térmica, sobretodo en época invernal, para lograr el mantenimiento de la temperatura de los reactores (Reynoso, M., 2017).

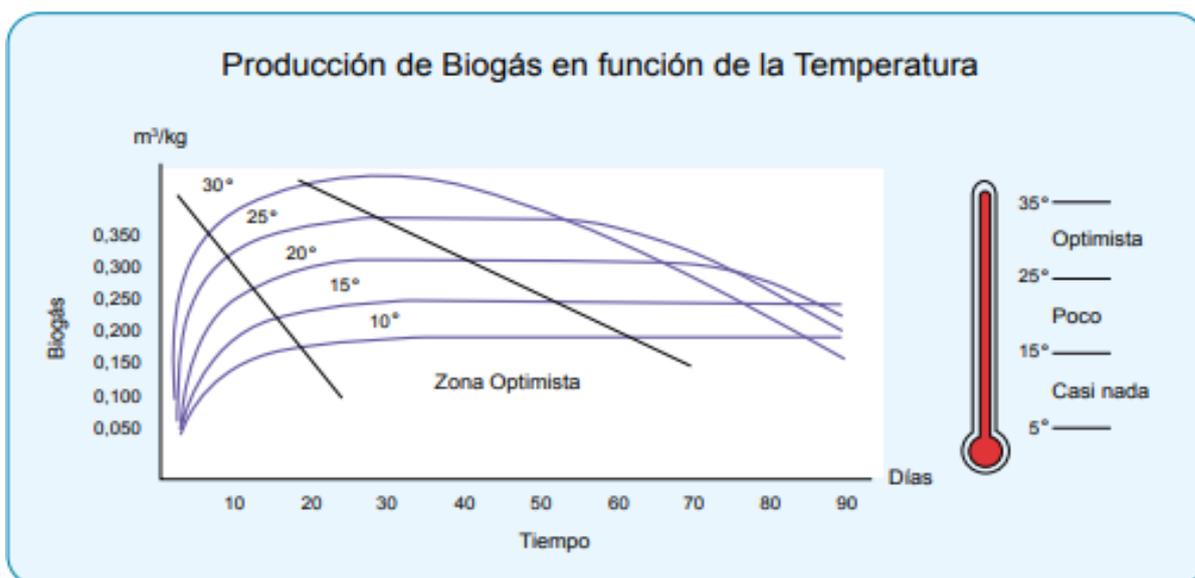


Figura N° 18: Producción de Biogás en función de la temperatura. Fuente: FAO y col., 2011.

Al evaluar el rango de temperatura óptimo para el funcionamiento del biodigestor, se deben tomar en cuenta todos los factores mencionados anteriormente. De acuerdo con Carhuacho León y col. (2012), la eficiencia y producción de biogás aumenta con el incremento de la temperatura, sin embargo, también se incrementan los costos de instalación y operación. Por lo tanto, se deben analizar y evaluar todas estas consideraciones para determinar el rango de temperatura adecuado para el biodigestor.

PH

El pH (Potencial de Hidrógeno) es una medida de la concentración de iones de hidrógeno en una solución. En función de esta concentración, la solución puede ser ácida (alta concentración de iones de hidrógeno) o alcalina (baja concentración de iones de hidrógeno). Es importante controlar el pH en el sistema de digestión anaeróbica, ya que los microorganismos encargados de la producción de biogás son altamente sensibles al pH, en especial los metanogénicas responsables de la producción de metano. El valor del pH en el digestor no solo afecta la producción de biogás, sino también su composición (ver Figura 19) (FAO, 2019).

En general, los diferentes grupos de microorganismos que intervienen en el proceso de digestión funcionan mejor con niveles de pH cercanos a la neutralidad (pH de 7). Sin embargo, cada grupo de microorganismos posee su propio pH óptimo, siendo para los microorganismos hidrolíticos valores entre 5 a 6; para los acetogénicos valores de 5,5 a 6,5; para los acidogénicos entre 5,5 y 6,5; y para los metanogénicos entre 6,5 y 8,2. Por lo tanto, para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6,0 ni subir de 8,0. Un descenso en el pH a valores inferiores a 6 genera un biogás muy pobre en metano (CH_4) y tiene menores cualidades energéticas (Carhuacho León y col., 2012).

Los valores de pH bajos reducen la actividad de los microorganismos metanogénicos, provocando la acumulación de ácido acético y H_2 . Al aumentar la presión

parcial de H_2 , las bacterias que degradan el ácido propiónico serán severamente inhibidas, causando una excesiva acumulación de Ácidos Grasos Volátiles (AGV) de alto peso molecular, particularmente ácidos propiónicos y butíricos, los que disminuirá la producción de ácido acético, generado una disminución del pH (FAO y col., 2011).

La caída del pH es causada frecuentemente por la acumulación de Ácidos Grasos Volátiles (AGV) y/o por la excesiva acumulación de Dióxido de Carbono (CO_2). Una de las soluciones es reducir la tasa de carga orgánica volumétrica hasta el punto en el cual los AGV se han agotado, y así, el pH del sistema logra retomar a valores normales (FAO y col., 2011).

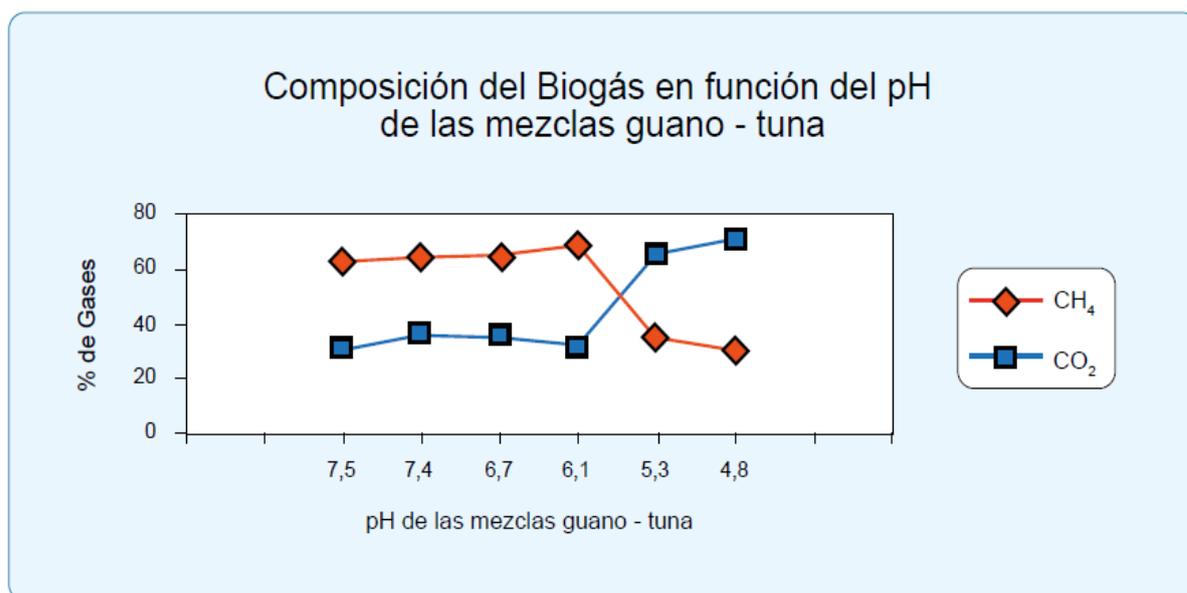


Figura N° 19: Composición del Biogás en función del PH que poseen la mezcla Guano -Tuna. Fuente: Varnero y Arellano, 1991 citado en FAO, 2011.

Entendiendo entonces, que el pH presenta variaciones dependiendo de las características de la mezcla que ingresa al biodigestor y debido a los procesos que ocurren dentro del biodigestor. Esto lleva a que sea indispensable supervisar con periodicidad el pH de todos los sustratos, para poder realizar a tiempo las correcciones antes de que se inhiba el metabolismo de los microorganismos metanogénicos y se deje de producir biogás. El indicador más usado para supervisar el pH y poder corregirlo a tiempo es el llamado FOS/TAC, que es la relación entre los ácidos orgánicos volátiles y la capacidad compensadora alcalina del medio (FAO, 2019).

El Centro Federal Alemán de Investigación Agrícola (Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft/FAL) desarrolló el análisis de FOS/TAC a partir de un test de valoración (Método Nordmann) con el fin de determinar el cociente de la concentración ácida y la capacidad compensadora alcalina del sustrato de fermentación. FOS significa Flüchtige Organische Säuren, es decir, ácidos orgánicos volátiles y se mide en mg Ac. Acético/l. En tanto, TAC significa Totales Anorganisches Carbonat, esto es, carbonato inorgánico total (capacidad de compensación alcalina), y se mide en mg $CaCO_3$ /l (Reynoso y col. 2017).

La relación FOS/TAC está reconocida desde hace tiempo como valor guía para evaluar los procesos de fermentación y permite detectar a tiempo los problemas del

proceso, hasta el inminente vuelco de la fase biológica del digestor, con lo que pueden tomarse contramedidas inmediatamente. En la práctica, una relación FOS/TAC de 0,3 a 0,4 es normal, aunque cada planta tiene su propio valor óptimo, el cual sólo puede determinarse mediante una observación a largo plazo y controles regulares, puesto que existe una fuerte dependencia del sustrato (Reynoso y col. 2017).

Tabla N° 9: Reglas empíricas para la evaluación de relaciones FOS/TAC (valores empíricos proporcionados por DEULA-Nienburg). Fuente: Reynoso y col., 2017.

VALOR DE LA RELACIÓN FOS/TAC	ANTECEDENTES	MEDIDA
>0,6	Excesiva sobrealimentación de biomasa	Interrumpir la adicción de biomasa
0,5 - 0,6	Excesiva entrada de biomasa	Agregar menos biomasa
0,4 - 0,5	La planta está muy cargada	Vigilar la planta más estrechamente
0,3 - 0,4	La producción de biogás es máxima	Mantener constante la entrada de biomasa
0,2 - 0,3	La entrada de biomasa es muy baja	Aumentar lentamente la entrada de biomasa
< 0,2	La entrada de biomasa es bajísima	Aumentar rápidamente la entrada de la biomasa

Inhibidores y promotores

El proceso anaeróbico puede ser afectado de forma significativa por compuestos y sustancias que actúan de forma perjudicial y/o letal sobre los microorganismos del proceso, produciendo una disminución y/o parálisis completa de las reacciones del proceso, como los metales pesados, fenoles, cianuros, agentes oxidantes fuertes, antibióticos, pesticidas y sales. Sin embargo, hay compuestos que actúan de forma benéfica o promotora, es decir, estimulando los microorganismos metanogénicos y aumentando significativamente la producción de biogás; compuestos como el níquel, cobalto, molibdeno y selenio. Vale aclarar que las sustancias resultarán perjudiciales o benéficas dependiendo la concentración en la que se hallen (Lorenzo Acosta y col., 2005).

INHIBIDORES	CONCENTRACION INHIBIDORA
SO ₄	5.000 ppm
NaCl	40.000 ppm
Nitrato (según contenido de Nitrógeno)	0,05 mg/ml
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200-500 mg/l
CN (Después que se han domesticado las bacterias metanogénicas a 2-10 mg/ml).	25 mg/l
ABS (Detergente sintético)	20-40 mg/l
Na	3.500-5.500 mg/l
K	2.500-4.500 mg/l
Ca	2.500-4.500 mg/l
Mg	1.000-1.500 mg/l

Figura N° 20: Concentración de compuestos en la biodigestión que resulta inhibitoria del proceso. Fuente: Hilbert, 2011.

Agitación o mezclado

La agitación o mezclado consiste en producir una remoción del sustrato con el objetivo de que se distribuya homogéneamente ayudando a que las bacterias entren en contacto con el mismo, favorezcan una más rápida digestión de la biomasa y por lo tanto incrementen la producción de biogás. También, permite que no se forme costras, ayuda a homogeneizar la temperatura, se uniformice la densidad bacteriana, se distribuyan los metabolitos y se eviten espacios "muertos", es decir, sin actividad biológica. El sistema de agitación a emplear puede ser batido manual, utilizando hélices, recirculando el sustrato con bombas, etc. (Hilbert y col., 2011.); (Carhuancho León y col., 2012).

Tiempo de retención hidráulica

El **Tiempo de Retención Hidráulica** o **TRH**, indica el tiempo que el sustrato permanece dentro del biodigestor y está sometido a biorreacciones por parte de los agentes microbianos responsables de la digestión anaeróbica (Vega y col. 2022). En los biodigestores continuos y semicontinuos, el **THR** se define como el valor en días, como resultado del cociente entre el volumen operativo del biodigestor y el volumen de carga diaria, que va a depender del tipo de sustrato y de la temperatura del mismo. En cambio, para un biodigestor de tipo discontinuo, será el tiempo de retención de los sustratos desde su carga, hasta su descarga (Guisasola, 2022).

$$TRH = \frac{VR}{C}$$

Donde **THR**: Tiempo de Retención Hidráulico (día); **VR**: Volumen del Reactor (m³); **C**: Carga de Alimentación al Reactor por Unidad de Tiempo (m³/día).

Esta variable como ya se mencionó está muy relacionada a la temperatura, donde a mayor temperatura, mayor actividad biológica y por lo tanto menor TRH. No obstante, también depende de la composición del sustrato, donde si se da una alta relación C/N, requerirá de mayores THR para ser digeridos (Guisasola, 2022).

1.6.4 TIPOS DE SISTEMAS DE BIODIGESTIÓN

Un biodigestor básicamente consiste en un depósito o contenedor cerrado, donde se transforma la materia orgánica mediante la digestión anaeróbica en biogás y bioabonos. Los biodigestores poseen entre sus diversas partes un recinto conocido como "Gasómetro" donde se almacena el biogás, que generalmente va en la parte superior en la forma del domo o separado del propio biodigestor y puede ser rígido o flexible. (Rodríguez Venandy y col., 2012).

Los reactores anaeróbicos pueden ser construidos de ladrillo, hormigón, hormigón armado, plástico, telas compuestas impermeables, acero u otro material que asegure las condiciones requeridas de resistencia, impermeabilidad y funcionamiento. Hay que tener presente que se les debe proporcionar determinadas condiciones para su buen funcionamiento como una buena hermeticidad, seguridad contra fuego directo y explosiones,

facilidad para la carga y descarga de efluentes, almacenamiento y uso del biogás, agitación parcial o total del sustrato (Barrena y col.,2019).

Existen diversos diseños y tipos de biodigestores de acuerdo a su complejidad, utilización, formas de operación, etc. Según (Hilbert, 2011), existen diferentes maneras de clasificarlos y de agruparlos para simplificar el análisis y comprensión como se presenta en la tabla a continuación.

Tabla N° 10: Clasificación de los Biodigestores. Fuente: Hilbert, 2011.

1. FRECUENCIA DE CARGA	a) Sistema batch b) Sistema continuo c) Sistemas semicontinuos
2. INTENSIDAD DE MEZCLA	a) Mezcla completa b) Mezcla parcial o nula
3. MANEJO DEL SUSTRATO	a) Contacto anaeróbico b) U.A.S.B (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) c) Lecho fluidizado d) Filtro anaeróbico
4. MANEJO BIOQUÍMICO	a) Una etapa b) Dos etapas

Frecuencia de carga

Se relaciona con la frecuencia con la que se añade el sustrato y la salida del efluente producido (Guisasola, 2022). Los biodigestores según este criterio se clasifican en tipo discontinuo, continuo y semicontinuos.

a. Biodigestor Bach (discontinuos)

Se caracterizan porque la cámara de digestión es llenada y vaciada totalmente, y además están sellados herméticamente impidiendo entradas o salidas del material-, con excepción del biogás, que si es recolectado (Carhuacho León y col., 2012). Estos atraviesan todas sus fases por lo cual son una medida para la caracterización de los productos y residuos (Rodríguez Venady y col., 2012). En general son construidos pequeños, y son muy utilizados en pruebas experimentales de laboratorio para analizar los potenciales de biogás que poseen distintos tipos de sustratos, conocido como BMP (Guisasola, 2022).

b. Biodigestores Continuos

En este tipo de digestores el volumen que ingresa desplaza una cantidad equivalente de efluente o digestato, que se evacua por la salida, garantizando que el volumen del sustrato en la cámara de digestión se mantenga constante (Hilbert y col., 2011). Este tipo de reactores se deben cargar diariamente, y preferencia de manera uniforme a lo largo del día, para asegurar que el proceso sea ininterrumpido por lo que es necesario emplear bombas para alimentarlos y otros equipos que les asegure calefacción y agitación (Bernal Patiño y col, 2018).

Resultan muy útiles en el tratamiento de aguas negras, por lo que son de gran capacidad. Además, dado que generan una gran cantidad de biogás se los emplea habitualmente, en aplicaciones industriales (FAO, 2011).

c. Biodigestores Semicontinuos

En este caso se introduce una carga inicial, y posteriormente, teniendo en cuenta el tiempo de retención hidráulico (THR) y el volumen del tanque se agregan nuevas cargas (Bernal Patiño y col, 2018). En general, se descargan totalmente una o dos veces por año, con el objetivo de hacer un aprovechamiento de los residuos y lodos fermentados del biodigestor como fertilizantes para los cultivos (Guisasola, 2022).

Los diseños más populares son el digestor Indiano o hindú (domo flotante), chino (domo fijo) y taiwanés (alargado, bolsa o balón) (Hilbert, 2011); y el biodigestor de flujos pistón de estructura flexible (Bernal Patiño y col, 2018).

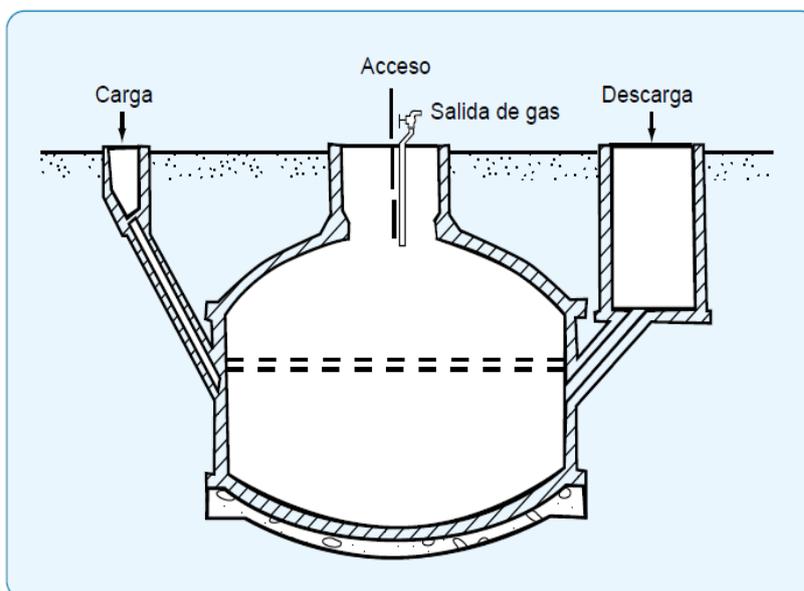


Figura N° 21: Biodigestor Chino (Domo fijo). Fuente: FAO, 2011.

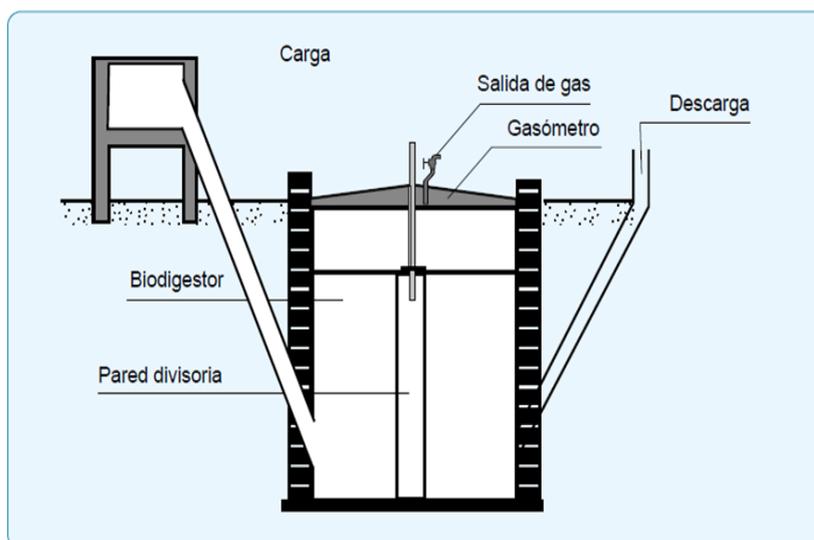


Figura N° 22: Biodigestor Hindú (domo flotante). Fuente: FAO, 2011.

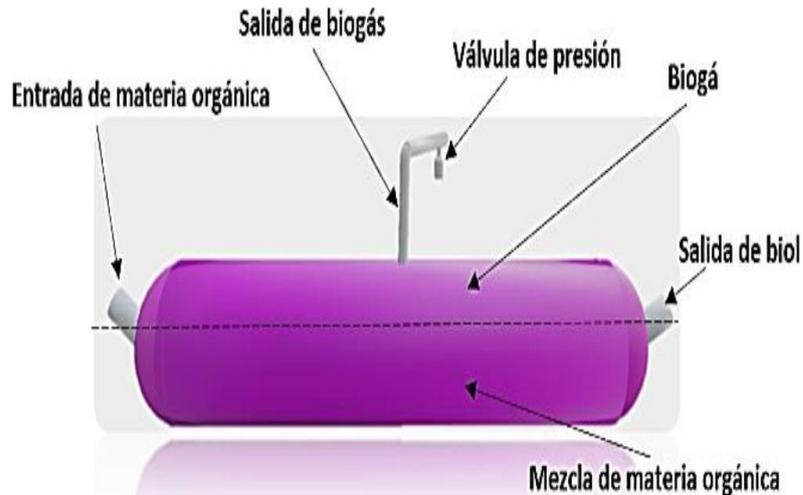


Figura N° 23: Biodigestor Taiwanés (alargado, bolsa o balón). Fuente: Vega. D y col., 2022).

Tipo de Mezcla

a) Biodigestores de Mezcla Completa

En estos digestores se busca mantener una distribución uniforme de concentraciones, tanto de sustrato como de los microorganismos del mismo. Es decir, se busca que el sustrato que se encuentra en el interior del reactor se mezcle en forma total, en general diariamente (Hilbert, 2011). La agitación puede ser mecánica mediante un agitador de Hélice o palas, de eje vertical u horizontal) o neumática (recirculación del biogás a presión), y se realiza a baja velocidad (FAO, 2011). Este tipo de biodigestor es ampliamente difundido para el tratamiento de residuos agroindustriales y para la generación de energía en sistemas CHP (Combined Heat and Power) (Guisasola, 2022)

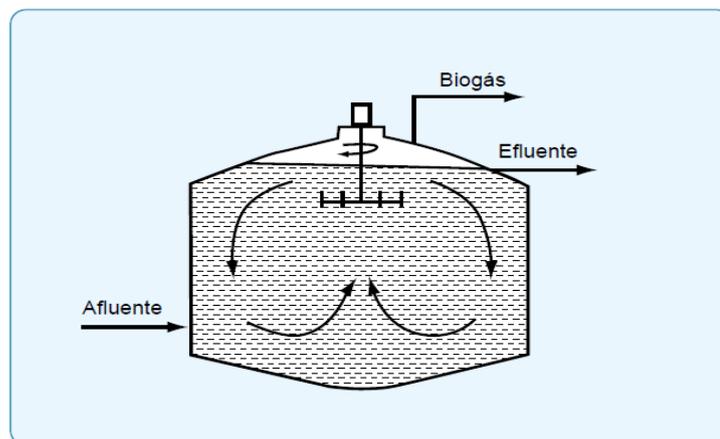


Figura N° 24: Biodigestor de Mezcla completa. FAO, 2011.

b) Biodigestor de Mezcla Parcial

Es un tipo de biodigestor muy implementado en ambientes rurales con sistemas de agitación sencillos, como agitación de tipo manual rotación de la campana gasométrica. Estos sistemas de agitación se realizan con el fin de evitar la formación perjudicial de costra (Hilbert, 2011).

Manejo bioquímico

a) Biodigestores de una etapa

En este sistema todo el proceso se lleva a cabo en un único reactor. Es un diseño que posee pocas complicaciones, pero requiere de un largo tiempo de retención porque las tres primeras etapas, que involucran degradación del material, ocurren en la misma cámara (Bernal Patiño y col, 2018).

b) Biodigestores de dos etapas

Sistema que basa su funcionamiento en la separación de las etapas del proceso. Básicamente, se separan las primeras etapas (hidrolisis y acidogénesis) de la metanogénesis. Todo esto favorece un mejor manejo de los principales grupos microbianos involucrados, y, por lo tanto, estabilidad al proceso (Bernal Patiño y col, 2018).

1.6.5 CONTENIDO ENERGÉTICO Y FACTOR DE EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) DEL BIOGÁS

El biogás resulta ser un producto energético debido a que brinda la posibilidad de servir como fuente de energía. El potencial de aprovechamiento energético del biogás seco se debe principalmente a la reacción de combustión del CH_4 . Si bien el SH_2 es una especie reducida que también se combustiona entregando energía, no obstante, se encuentra en una concentración preferentemente baja en el peor de los casos, por lo que se considera despreciable. Entonces, el poder calorífico del biogás dependerá proporcionalmente de su contenido de CH_4 (Briseño y col., 2017).

El PCI (Poder Calorífico Inferior) del metano puro es de aproximadamente 10 KWh/Nm^3 , lo que por permite calcular entonces un contenido energético bruto de cualquier biogás a partir de su proporción de metano. Por ejemplo: un biogás compuesto con un 65% de Metano (CH_4) posee un valor calorífico del biogás 6,50 KWh/Nm^3 biogás (Martí Herrero, 2020). Esto, lo convierte en un gas combustible con un potencial de utilidad en los procesos de generación de energía eléctrica y/o calorífica demostrando ser una bioenergía capaz de sustituir a los combustibles fósiles en la generación de energía (Briseño y col., 2017).

Tabla N° 11: Composición energética de 1m^3 de biogás con 65% CH_4 y su equivalencia con otras fuentes de energía. Fuente: Martí Herrero 2020.

1m^3 de Biogás (65% CH_4) es equivalente a:	
5647 kcal	Energía (65% CH_4)
6,50 KWh	Energía (65% CH_4)
1,6 kg	Madera
0,7 kg	Carbón
1,1 litros	Alcohol
0,75 litros	Gasolina
0,65 litros	Gas-oil
0,76 m3	Gas Natural

Además, de servir como fuente de energía, el biogás es un combustible ecológico (bioenergético). Esto se da porque no genera emisiones de Dióxido de Carbono (CO₂) ya que posee un factor de emisión prácticamente neutro (Ver tabla N°12) (Briseño Arciniega y col., 2017). Por esta razón, el CO₂ no se contabiliza en el balance final de Gases de Efecto Invernadero (GEI), porque el CO₂ que se emite en los diferentes usos de tipo energético ha sido previamente fijado en la materia vegetal durante su crecimiento, y, por lo tanto, no contribuye a un incremento en el balance de gases GEI (Guisasola, 2022).

Tabla N° 12: Comparación de valores caloríficos y factores de emisión de CO₂ para diferentes combustibles. Fuente: Briseño Arciniega y col., 2017.

COMBUSTIBLE	VALOR CALORÍFICO (CV) APROXIMADO EN MJ/KG	FACTOR DE EMISIÓN INDIRECTO (KGCO₂Eq/GJ, CV NETO)
Petróleo	45,21	12,51
Gas Natural	36	5,55
Gas Natural Licuado	55,14	20
Keroseno	43,12	13,34
Diésel	44,79	13,13
Biogás	23	0,246

Entonces, llevar a cabo la biodigestión, sirve para remplazar de manera parcial o total a las energías convencionales, como el carbón, el petróleo y el gas; los cuales si contribuyen a un incremento de los gases GEI en la Atmósfera por los factores de emisión que poseen (Ver Tabla N° 12). Según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (2013) citado por (Guisasola, 2022), a nivel mundial, el 86% del total de gases GEI emitidos se debe a la generación y uso de energía del tipo convencional.

No obstante, el biogás puede formarse en el ambiente naturalmente, liberándose CH₄ y CO₂, de forma no controlada. Sin embargo, construir biodigestores hace que el CH₄ que se generaría naturalmente por descomposición de la biomasa, sea combustionado, y en el mejor de los casos aprovechado, formando como productos en CO₂ y H₂O; evitándose así la emisión directa del Metano (CH₄). Lo mencionado, resulta clave debido a que el CH₄ posee un potencial de calentamiento global de 21 veces mayor que el CO₂ medidos en un lapso de 100 años (FAO, 2011).

La biodigestión además de evitar la emisión natural de CH₄ y de gases GEI, ofrece también otras ventajas. Estas ventajas están relacionadas con un menor consumo de energía, menor requerimiento de espacio, menores costos en general y tratamiento de los materiales orgánicos (Ajay y col., 2021); (Briseño Arciniega y col., 2017).

1.6.6 EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE BIOGÁS EN ARGENTINA

El INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial), en colaboración con el INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria), realizaron, en el año 2014, el relevamiento de un total de 61 plantas de biogás distribuidas en todo el territorio nacional y detectaron la existencia de más de 105 instalaciones que se encontraban operativas (Goicoa, 2016).



Figura N° 25: Ubicación geográficas de plantas relevadas en Argentina. Fuente: Goicoa, 2016.

A partir del relevamiento se pudieron obtener los siguientes datos:

- El 53,1% de las plantas pertenecen al sector privado, seguido por el sector público con el 37,5%; mientras que las pertenecientes a cooperativas y ONG suman en conjunto un 4,7%.
- Con respecto a las instalaciones de carácter público, el 54,2% se construyó con objetivos de tratamiento, principalmente como sistemas de tratamiento de efluentes cloacales y valorización de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU). En segundo lugar, con el 33,3%, los biodigestores se construyeron con fines educativos y/o de investigación, como es el caso de lo que ocurre en el “Aula Satélite Unidad N°4 – Colonia y Granja Penal -Juan Bautista Vítale Nocera”.
- Cuando se analiza el tamaño de las instalaciones, prácticamente la mitad del total de las plantas relevadas son de pequeño tamaño. Además, el 52,4 % de las plantas se encuentran distribuidas en zona rural (Ver gráfico N°2) y la tecnología más empleada es la de mezcla completa.
- Ahora si solamente se analiza la utilización del biogás como fuente de energía se observa que el 44,3% del biogás que se aprovecha se usa con fines térmicos. Por

último, vale mencionar, que los sustratos más utilizados como son los procedentes de la industria, y seguidos en orden de importancia por los residuos sólidos urbanos y los de ganadería (Ver gráfico N°3).

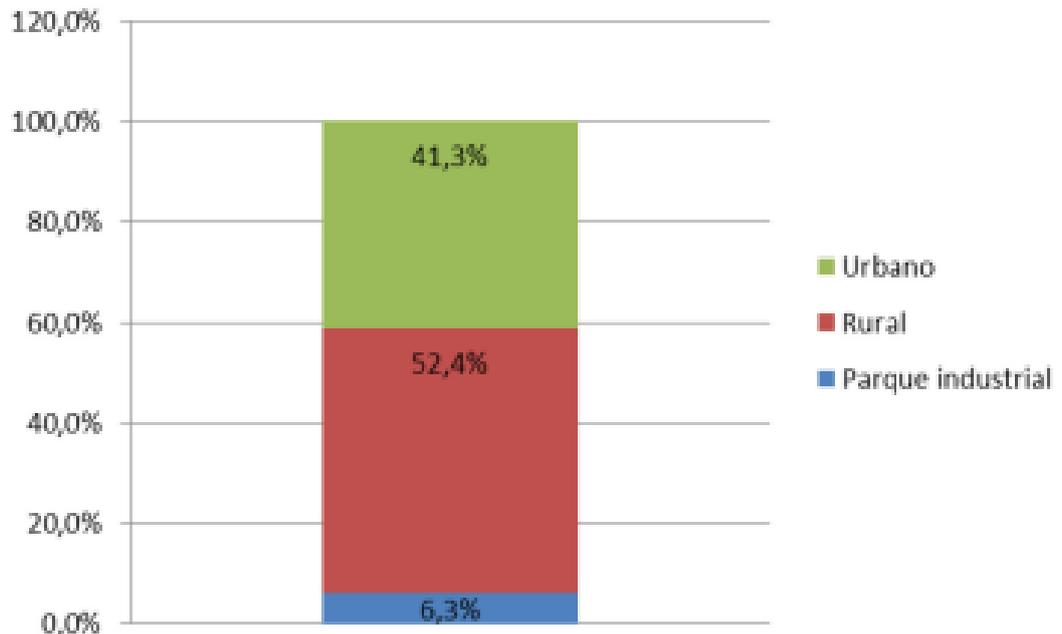


Gráfico N° 2 Ubicación de las plantas de biogás relevadas. Fuente: Goicoa, 2016.

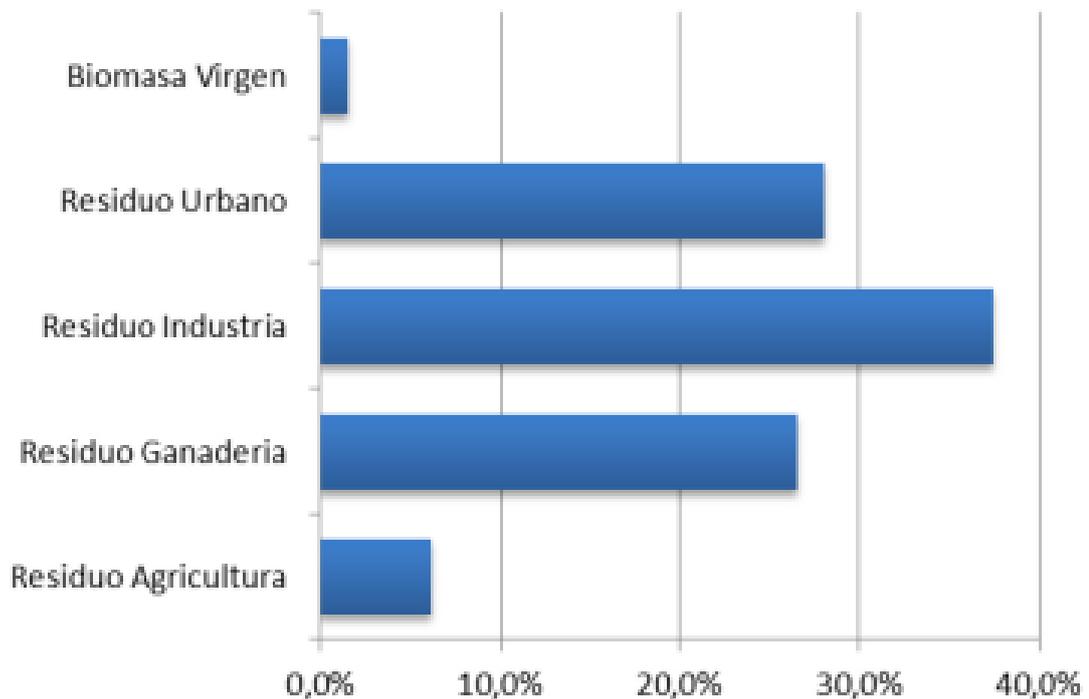


Gráfico N° 3: Sustratos comúnmente utilizados. Fuente: Goicoa, 2016.

Todo lo mencionado anteriormente es válido al año del reseñado relevamiento (2016), ya que luego comenzó una etapa de instalación de nuevas plantas industriales de biogás para la inyección de energía eléctrica al Sistema Interconectado Nacional y es un proceso que continúa hasta la actualidad.

1.6.7 LEGISLACION Y NORMATIVAS EN ARGENTINA PARA EL BIOGÁS.

En Argentina en el año 2006 se promulgó la Ley N° 26.190 sobre “Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica”, que luego, en el año 2015, esta ley fue modificada por la Ley N° 27.191 "Régimen Nacional para el Fomento del Uso de Fuentes de Energía Renovables – Generación de Energía Eléctrica". Con esta nueva Ley se buscaba promover incentivos y beneficios para quienes generan energía a partir de fuentes renovables. También se buscaba establecer el objetivo de lograr una contribución de las fuentes de energía renovables equivalente al 20% del consumo nacional total de electricidad para finales de 2025 (Hilbert y col.,2022).

La ley N° 27.191, generó que en el año 2016 se pusiera en marcha el plan Renovar, donde se adjudicaron varios proyectos de biogás. Posteriormente, en el año 2017, el Congreso de la Nación Argentina aprobó la Ley N° 27.424 para la promoción de la generación distribuida de energía renovable conectada a la red y permitió establecer un marco legal para el biogás y el biometano. Siendo así que, en el año 2019, ENARGAS aprobó el reglamento técnico NAG-60275 sobre la calidad del gas natural que, entre otras cuestiones, abordó las brechas técnicas en relación con el uso de biogás y biometano para redes de gas aisladas (Hilbert y col.,2022)

El 4 de agosto de 2021 se publicó en el Boletín Oficial N° 34.716 el nuevo marco regulatorio de biocombustibles, bajo la ley N° 27.640/2021 de Biocombustibles y la sustentabilidad ambiental agroproductiva y energética. La mencionada ley regula las actividades de elaboración, almacenaje, comercialización y mezcla de biocombustibles. Los biocombustibles regulados en la ley son el bioetanol, el biodiésel (art.4) y el “biogás crudo, biogás, biometano, biojet u otros biocombustibles puros o mezclados en distintos porcentajes con combustibles fósiles autorizados, así como de sus diferentes mezclas (art.23) (Mamarra, 2021).

Además, el Ministerio de Agricultura de Argentina y la FAO han venido desarrollado un programa llamado Probiomasa 76 para promover la producción de energía de biogás y biomasa a través de licitaciones de energía renovable. Este programa finalizó en junio de 2020, pero se está discutiendo una extensión que se centraría en los residuos agrícolas y agroindustriales (Hilbert y col., 2022).

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar energéticamente la etapa de pasteurización del proceso productivo del hongo, en combinación con el aporte del biodigestor y su eventual sistema de calentamiento, y realizar una propuesta de mejora integral para optimizar el consumo energético, minimizando el uso de combustibles fósiles y aprovechando los residuos orgánicos generados in-situ.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Cuantificar y caracterizar la disponibilidad de residuos orgánicos que se producen en la granja del penal.
- Estimar el potencial energético por medio de la digestión anaerobia de los residuos orgánicos.
- Determinar los requerimientos de energía térmica de la etapa de pasteurización del proceso productivo del hongo *Girgola*.
- Estudiar el balance energético del biodigestor con un eventual sistema de calentamiento.
- Plantear posibles alternativas de mejoras que maximicen el aporte energético del biodigestor al proceso de pasteurización del hongo *Girgola*.

2.3 METODOLOGÍA

2.3.1 ESTUDIOS DE ANTECEDENTES Y BIBLIOGRAFÍA.

En primer lugar, se debe realizar entrevistas con el fin de conocer y obtener la información necesaria para cuantificar la disponibilidad y el potencial energético de los residuos pecuarios en la granja, así como determinar los requerimientos de energía térmica del proceso productivo del hongo *Girgola*. Para ello:

- Primero, se realiza una entrevista al director del proyecto del hongo *Girgola* en el Penal, con el objetivo de recopilar datos generales sobre su proceso productivo. En la entrevista se debe abordar las características del cultivo de la variedad de hongo producida en el penal, las etapas del proceso productivo desarrolladas en el establecimiento, principalmente la etapa de pasteurización, la forma de producción y almacenamiento, los factores relevantes del proceso, así como las características del invernadero donde se cultiva el hongo, etc.

- Segundo una entrevista al referente del área productiva agropecuaria de la Colonia para relevar datos de la cantidad de animales por especie, forma de cría y alimentación, así como la estimación de desechos (estiércoles) que generan, su disposición final y posible variación estacional. Además, se solicita información sobre los cultivos del predio, estimación de la cantidad de residuos generados y la variación estacional de los mismos.

Por otra parte, se buscan los datos de las variables climáticas de temperatura (°C), velocidad del viento (m/s) y radiación solar (Wh / m² * día) de la estación meteorológica de Gustavo André en Lavalle, o de estaciones más cercanas en caso de no encontrar los datos. Esta información se solicita a organismos especializados en materia climática, como la Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas (DACC), el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y, en su defecto, al Departamento General de Irrigación (DGI).

2.3.2 CÁLCULO DE LOS RESIDUOS AGROPECUARIOS

A partir de la información sobre la cantidad de animales estabulados, se procede a utilizar el modelo de potencial energético para residuos ganaderos propuesto por Manrique (2015). Este modelo resulta útil para estimar cuantitativamente los residuos ganaderos generados en la granja del penal, así como el potencial energético que se obtiene al utilizarlos en la producción de biogás.

La ecuación N°1 permite calcular la masa de estiércol diaria total que se genera en la granja Penal. Esta viene dada por la sumatoria de la cantidad de animales de cada especie que se tienen en la granja multiplicado por valor tabulado de kilogramos (kg) de estiércol que se genera por animal diariamente de esa especie.

Ecuación N° 1: Masa de estiércol diaria (kg estiércol /día) (Manrique y col., 2015).

$$\text{Masa de Estiércol (kg/día)} = \sum Q (\text{Cantidad de Animales}) * (\text{kg de estiércol/animal} * \text{día})$$

A partir de la masa de estiércol producido por los animales diariamente (kg de estiércol/animal*día) y el porcentaje de sólidos volátiles (% SV) en base húmeda de cada estiércol (ambos valores tabulados), se puede obtener la masa de sólidos volátiles (kg de SV) generados diariamente por cada animal de la especie, utilizando la Ecuación N°2.

Ecuación N° 2: Masa de Sólidos Volátiles (SV) producidos diariamente por animal de una especie (Manrique y col., 2015).

$$\text{SV (kg SV /animal*día)} = \text{kg de estiércol/animal*día} * \text{Sólidos Volátiles (\% SV) en base húmeda}$$

Luego, con datos de la producción de metano (P_{CH₄}) producidos por los estiércoles de cada especie de animal en el corral que se encuentran tabulados, se calcula el Índice de Producción de Metano (CH₄). Esto es debido a que el contenido energético del biogás producido mediante digestión anaeróbica se determina principalmente por la concentración de este gas (a mayor concentración de CH₄ mayor contenido energético del biogás).

Ecuación N° 3: Índice de Producción de Metano (IPM) (Manrique y col., 2015).

$$IPM = SV * 365 * P_{CH_4} * 0,67$$

Donde:

IPM: Índice de Producción de Metano (CH₄) (kg CH₄/animal. año).

SV: Sólidos Volátiles por animal por día. Excreción diaria de sólidos volátiles de un animal dentro de una población definida (kg SV/día*animal).

365: días del año (día/ año).

P_{CH₄}: Producción de CH₄ del estiércol (Nm³ CH₄/kg SV) en CNPT (1 atm y 15°C) según Manrique y col., 2015.

0,67: Densidad del Metano (CH₄) (kg/m³) en CNPT (1 atm y 15°C) según Manrique y col., 2015.

Finalmente, para estimar el potencial energético (PE) total de los residuos ganaderos que se producen en la granja del Penal de Gustavo André se emplea la ecuación N°4, que involucra una sumatoria de los valores que se obtienen por multiplicar la cantidad de animales estabulados en la granja de cada especie (Q), con el Índice de Producción de Metano (IPM) de obtenido para dicha especie y el Poder calorífico inferior (PCI) del Metano (CH₄).

Ecuación N° 4: Potencial Energético Anual (MJ/año) (Manrique y col.,2015).

$$PE (MJ/año) = \sum Q * IPM * PCI$$

Donde:

PE: Potencial energético del bioma residual pecuaria (MJ/año)

Q: Cantidad de animales (Número de cabezas)

PCI: Poder Calorífico Inferior del Metano (CH₄). El Poder Calorífico Inferior (PCI) es aproximadamente de 34 MJ/Nm³ o de 50,2 MJ/kg.

IPM: Índice de Producción de Metano (CH₄) (kg.CH₄/animal. año). Se determina con la ecuación N°4.

2.3.3 DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DEL PROCESO DE PASTEURIZACIÓN

Para poder realizar la determinación de la demanda energética de la etapa de pasteurización del proceso productivo del hongo *Girgola* que se lleva a cabo en Penal, se toma los datos e información obtenidos mediante entrevista con el director del proyecto del Hongo respecto a:

- El consumo de garrafas de GLP (Gas Licuado de Petróleo) que utiliza la caldera para producir el vapor que luego suministra al pasteurizador rotativo donde se desinfecta el sustrato del hongo *Girgola*.
- El tiempo completo en horas de la etapa de pasteurización (desde que se comienza a calentar el agua en la caldera hasta que se considera completamente pasteurizado el sustrato).

- El número de veces a la semana que se repite la pasteurización.

También mediante bibliografía se podrá obtener el Poder Calorífico Inferior (PCI) del Gas Licuado de Petróleo, como así también el Poder Calorífico Inferior (PCI) del Biogás. Este último dato resulta apropiado para calcular la demanda energética de cada pasteurización en Nm³ de biogás requerido por el proceso.

2.3.4 CÁLCULO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DEL BIODIGESTOR DEL PENAL

Poder obtener la cantidad de biogás (Nm³ biogás) que puede potencialmente generar el biodigestor de mezcla completa que se encuentra en el penal, que hasta el momento nunca entró en funcionamiento, es necesario realizar un relevamiento de sus características, dimensiones y ubicación, entre otras. Además, se debe definir sus condiciones de operación, principalmente la temperatura de funcionamiento, basándose en los datos obtenidos de las variables climáticas de la zona de Gustavo André.

Una vez que se ha definido la temperatura de operación del biodigestor, se procede a utilizar la fórmula implementada por Mazeh Dehaini (2022) para obtener el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH). Esta ecuación se basó en una simulación de datos obtenidos de diversas fuentes, con el objetivo de establecer una relación entre la temperatura y el TRH. Como resultado, se logró obtener una curva de tendencia logarítmica que relaciona el TRH con la temperatura de acuerdo con una ley determinada por datos experimentales.

Ecuación N° 5: Tiempo de Retención Hidráulica (Mazeh y col., 2022).

$$\text{TRH} = (-51,227 * \text{LN} (\text{T}^{\circ}\text{C}) + 206,72)$$

Donde:

- **TRH:** Tiempo de Retención Hidráulico (TRH), en días.
- **T°C:** Temperatura en °C.
- **LN:** Logaritmo Natural.

El valor obtenido de TRH de la ecuación anterior, resulta útil para conocer, aplicando la ecuación N°6 propuesta por FAO (2011), el volumen de carga diaria (m³estiércol/día) que se debe incorporar al biodigestor.

Ecuación N° 6: Volumen de Carga diaria (FAO, 2011).

$$\frac{\text{Volumen del digestor (m}^3\text{)}}{\text{Tiempo de retención (días)}} = \text{Volumen de carga diaria m}^3\text{/día}$$

Además del volumen de carga diaria o caudal diario de alimentación (m³ mezcla / día), se consulta la bibliografía para determinar los contenidos de Sólidos Totales (ST) y Sólidos Volátiles (SV) de los estiércoles. Estos valores son necesarios para conocer las características de los sustratos y saber, aplicando la ecuación N°7, la cantidad de agua se necesita para diluirse la mezcla y que esta no supere el 8% de Sólidos Totales (%ST) según (FAO y col. 2011). Todo esto permite garantizar una óptima producción de biogás.

$$\% \text{ S.T. (carga diluida)} = (1 \text{ kg co-sustrato} * \% \text{ S.T. co-sustrato}) / (1 \text{ kg co-sustrato} + (W))$$

Donde:

- % ST (Carga diluida)
- % ST(Co-sustrato)
- 1 kg de Co-sustrato
- (W) agua agregada en litros / kg de co-sustrato

El caudal diario de alimentación (m^3 estiércol/día), junto con la información bibliográfica sobre el contenido de metano (CH_4) que potencialmente pueden aportar los sustratos o combinación óptima, permite realizar el cálculo del flujo de biogás diario (Nm^3 Biogás/día) que se puede generar a la temperatura previamente definida. Mediante este valor se determinará el contenido energético del biogás producido diariamente.

2.3.5 PROPUESTAS DE MEJORA

Basándose en la información previamente obtenida, se procede a realizar propuestas de mejora de aislamiento y/o calefacción de la caldera y el biodigestor. Para llevar a cabo estas propuestas, resulta útil usar el software "SIMUSOL" con el objetivo de analizar y simular los comportamientos térmicos de ambos sistemas, en la situación actual y con la eventual propuesta de mejora.

SIMUSOL

El software SIMUSOL permite facilitar la descripción y simulación de sistemas térmicos (consultar SIMUSOL.org⁶). El software utiliza como base tres programas que trabajan de manera conjunta mediante un conjunto de interfaces preparadas en el lenguaje de programación Perl:

- Sceptre: Programa base para realizar los cálculos y evaluar sistemas térmicos y eléctricos.
- DIA: Programa que permite el trazado de elementos geométricos y segmentos que los unen formando diagramas. También es capaz de permitir la incorporación de los iconos que sean necesarios para representar los sistemas térmicos.
- Gnuplot: Programa para representar los resultados en forma gráfica.

Con el SIMUSOL se ofrece una interfaz gráfica (DIA) que simplifica enormemente la introducción de los datos y la revisión de los resultados. Además, la interfaz llama automáticamente a los programas Sceptre, Gnuplot y las interfaces, sin necesidad de invocarlos de forma individual. La interfaz también se encarga de comprobar los datos e informar sobre los posibles errores cometidos tanto en la entrada de los mismos como en el proceso de ejecución (INENCO – CONICET, 2016).

A partir de esto, lo primero que se debe hacer es definir con precisión el esquema térmico del sistema en forma gráfica, utilizando el programa DIA. Luego, realizar los respectivos modelos térmicos, se deberá definir los valores en Cuadros denominados

⁶ <https://www.SIMUSOL.org/>

“INICIALES”, “TIEMPO”, “PARAMETROS” y “RESULTADOS”. Estos cuadros también podrán ir acompañados de tablas adicionales con información complementaria. Una vez que todo esté definido correctamente, podrás proceder a ejecutar las simulaciones correspondientes (Ver Anexo III).

Propuesta de Mejora Caldera

Una vez conocida la demanda energética de la caldera, y a partir de la información suministrada por Méndez (2022) respecto de la falta de aislamiento de la misma, así como de las condiciones térmicas del invernadero donde se encuentra ubicada; se procede a realizar una propuesta de mejora la misma. Previo a ello, se analiza y se simula mediante el programa “SIMUSOL” el comportamiento térmico sin aislar y con diferentes espesores de aislante seleccionado.

Por lo tanto, se debe realizar un modelo para la caldera tanto sin aislar como aislada, definiendo en los cuadros respectivos el área de la misma, el espesor de los materiales, los coeficientes de conductividad, convección y emisividad de cada uno. Se debe considerar las temperaturas de operación del equipo, de los materiales y del medio circundante, además de las correspondientes direcciones de flujo de transferencia de calor. Cabe aclarar que la temperatura del medio circundante de la caldera se basa en que, según Méndez (2022), se registra habitualmente en el invernadero durante los periodos de frío.

Para obtener el coeficiente convectivo de las diferentes fases del agua en el interior de la caldera se debe utilizar los valores que sea encuentra tabulados en bibliografía. En tanto, para obtener los coeficientes convectivos de los materiales se emplea la metodología planteada en el Capítulo 7 por Incropera, (1999) y Delgado, (2019).

Una vez que todo esté definido, se ejecuta la simulación para obtener los valores de transferencia de calor del sistema del equipo sin aislar y del equipo aislado para los distintos espesores comerciales del aislante seleccionado. Acompañando este análisis, se incluye el costo de cada espesor de aislante para compararlo con la información energética y determinar cuál resulta ser el espesor más adecuado a colocar.

Posteriormente, se selecciona el espesor correspondiente del aislante y, con esa información, se calcula la demanda térmica de la caldera aislada que tendría con ese espesor. También se calcula la cantidad de biogás (en m^3) requerida para satisfacer la demanda de la caldera aislada y se compara con la cantidad requerida por la caldera sin aislar.

Con los datos de la cantidad de biogás que se producirá con el biodigestor, se puede determinar cuánto alimentará energéticamente a la caldera aislada y con qué frecuencia. Además, se puede estimar la reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que se producirá al sustituir el GLP por biogás en el proceso de pasteurización.

Para calcular la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) evitadas por el uso de biogás en la pasteurización, primero se analiza la cantidad de gas licuado del petróleo (GLP) utilizado en la pasteurización durante un año. Luego, se multiplica este valor por el factor de emisión de GLP para obtener la cantidad total de dióxido de carbono (CO_2) emitida por el proceso de pasteurización con GLP. Finalmente, se multiplica esta cantidad de CO_2 por el porcentaje de reemplazo que se realiza con biogás para obtener

la cantidad de CO₂ evitada por la implementación del biogás en el proceso de pasteurización del hongo.

Propuesta de Mejora al Biodigestor

De manera similar a lo planteado para la caldera, se propone una propuesta de mejora para el biodigestor que se encuentra en la granja del penal. Teniendo en cuenta la temperatura de operación seleccionada, se realiza primero un análisis de la demanda energética que tiene el biodigestor sin aislar, así como con diferentes espesores del aislante seleccionado.

Para el análisis y cuantificación de los procesos de transferencia de calor entre el biodigestor y el medio, se utiliza el programa SIMUSOL con los mismos elementos para el modelado. Se debe proporcionar al programa información precisa sobre las características del mismo, el espesor de los materiales, los coeficientes de conductividad térmica, convección y emisividad de cada uno. Además, se introduce las temperaturas de operación, los materiales y el medio circundante, así como las direcciones correspondientes de flujos de transferencia de calor. Las simulaciones se ejecutarán para condiciones climáticas de invierno y verano.

Para obtener el coeficiente convectivo de sustrato acuoso en el interior del biodigestor, se pretende utilizar los valores que se encuentran tabulados. Además, para obtener los coeficientes convectivos de los materiales, se utiliza la metodología descrita en el Capítulo 7 de Incropera (1999) y Delgado (2019).

Una vez que todo esté definido, se procede a ejecutar la simulación para obtener los valores de variación térmica (°C/hora) del biodigestor sin aislar y aislado con los distintos espesores comerciales de aislante seleccionados. Esta evaluación se acompaña del costo de cada espesor de aislante y el costo de calefacción con una resistencia eléctrica y un colector solar.

Finalmente, se selecciona el espesor de aislante más apropiado para el biodigestor, junto con el método de calefacción más adecuado que se pueda realizar por la Colonia y Granja del Penal de Gustavo André.

3. SITUACIÓN EN LA GRANJA PENAL DE GUSTAVO ANDRÉ

3.1 SITUACIÓN ACTUAL DEL INVERNADERO DEL PENAL

En el invernadero perteneciente al CCT N° 6-038 Escuela Ing. César Cipolletti, ubicado en el Aula Satélite Unidad N°4 de la Colonia y Granja Penal Gustavo André, se comenzó a realizar, entre los años 2008 y 2009, el cultivo del hongo comestible de *Pleurotus ostreatus* var. *Florinda Girgolas*. El proyecto fue realizado en conjunto entre la Dirección General de Escuelas de la provincia de Mendoza y personal del CCT N° 6-038, cuyo director y encargado del proyecto era el docente Juan Carlos Méndez.

El proyecto del hongo Girgolas en el penal, tenía como objetivo hacer que funcionara una planta productora de dicho hongo en el predio para ofrecer capacitaciones laborales a las Personas Privadas de la Libertad (PPL). Esto buscaba contribuir a que, una vez recuperada su libertad, las PPL tuvieran herramientas necesarias para su reinserción en el mundo laboral y en la sociedad; y, por lo tanto, una oportunidad para mejorar su situación económica y/o la de sus familias.

El hongo Girgolas, *Pleurotus ostreatus* var. *Florinda Girgolas*, ha sido cultivado desde el invernadero del penal hasta el año 2020. Sin embargo, la pandemia por el Covid-19 ha paralizado su producción y comercialización hasta la actualidad. Según menciona el director del proyecto (Méndez, 2021) en una entrevista, el personal del CCT (Centro de Capacitación Tecnológica), PPL (Programas de Producción Local) y Dirección General de Escuelas, en colaboración con otras instituciones como la Universidad Nacional de Cuyo y el Instituto de Energía, busca reactivar la producción y comercialización del Girgolas mediante la implementación de mejoras que aumenten su producción y aseguren su sostenibilidad a largo plazo.

Cuando el hongo era producido y comercializado, se aseguraba que el mismo tuviera un tamaño promedio; en el que su diámetro fuera de 10 cm, el largo fuera de 8-12 cm y se tuviera peso que podía variar entre 50-80 gr. Una vez cosechado el hongo es colocado en bandejas, en frascos de conservas y en pickles, para luego ser comercializado en la central de abastos y centros regionales de la provincia de Mendoza.

El invernadero de producción cuenta con un área de 80 m² que posee la capacidad para producir 150 bolsas de 6 kg de sustrato. Esto significa que se puede utilizar 900 kg de sustrato húmedo para producir un total de 600 kg de hongos girgolas durante 3 meses, con un promedio de 4 kg por bolsa en las tres (3) oleadas de producción.

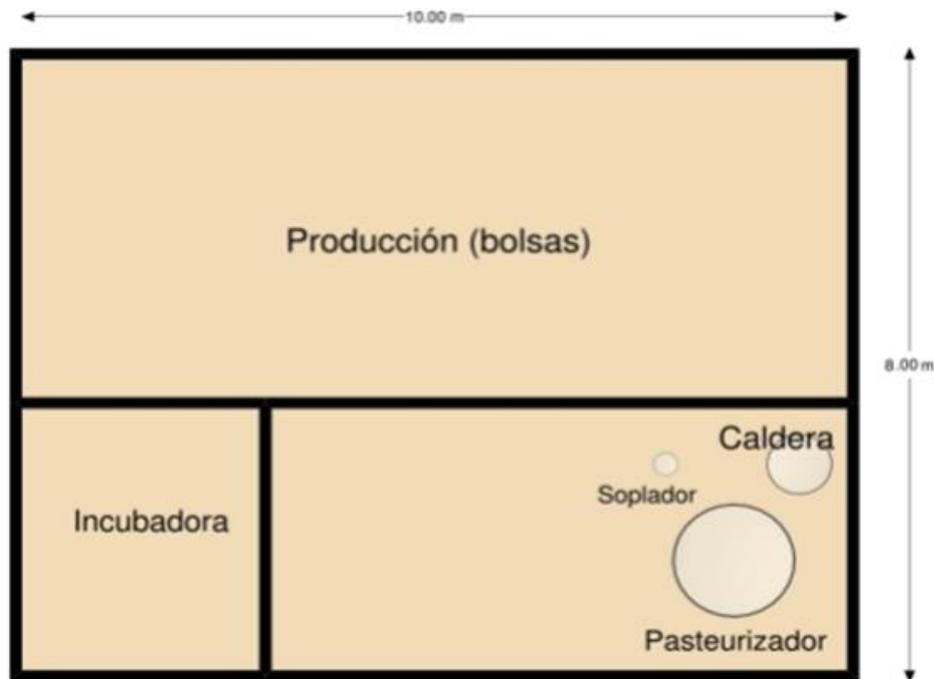


Figura N° 26: Esquema del invernadero de producción de la CCT N° 6-038 Escuela Ing. César Cipolletti, ubicado en el Aula Satélite Unidad N°4 de la Colonia y Granja Penal Gustavo André.
Fuente: Méndez, 2022.

Sin embargo, el entrevistado (Méndez, 2022) dice que previo a la situación de pandemia, se producían en el penal 70 bolsas de 7kg de sustrato c/u, donde se obtenían 4 kg de hongos por cada una en las tres (3) oleadas; esto daba en tres (3) meses un total de 280 kg de hongos *Girgolas*. Además de tener una producción menor a su capacidad instalada, se le debe sumar que la misma se realizaba de manera discontinua, es decir, se producía en un periodo un tiempo y después pasaba un tiempo sin producirse.

El hecho de que la producción en el penal fuera muy inferior a la capacidad instalada del invernadero, tenía que ver con diversas cuestiones. Estas cuestiones van desde climáticas donde se emplaza la Colonia y Granja Penal, situaciones estructurales del propio invernadero, los materiales y herramientas que se necesitan en la producción y hasta cuestiones operativas en el proceso productivo que dificultaban alcanzar el óptimo de producción y que fuera también discontinuo en el tiempo.

Dicho invernadero y la zona en donde se emplaza carece de conexión con la red de gas; por lo que en la etapa de pasteurización se utilizan garrafas de Gas Licuado de Petróleo (GLP). En tanto, para la etapa de incubación y de producción se utiliza un vaporizador y estufa eléctrica pequeña.

La etapa de pasteurización en el penal cuenta con un pasteurizador rotativo de 1000 litros (ver figura N°27), el cual es alimentado con vapor caliente producido mediante una caldera de vapor, que posee un quemador de un diámetro de 14 cm y hace uso de un tubo de (GLP) de 45 kg cada mes y medio.

La caldera (ver figura N°28) tiene un 1 m de alto, un diámetro de 40 cm, un área total de 1,50 m² y un volumen de 125 litros o 0,125 m³, está formada por una chapa de acero sin ningún tipo de aislamiento. Según Méndez, 2022; esto se debe a que esta caldera es antigua y se utilizaba previamente con calefacción a leña. La misma fue restaurada y

adaptada para ser alimentada actualmente con GLP. Además, Méndez, 2022; comenta que la misma posee todas válvulas de seguridad y un flotante para regular el ingreso de agua.



Figura N° 27: Imagen del Pasteurizador rotativo junto con la caldera. Fuente de elaboración propia, 2022.



Figura N° 28: Caldera del Invernadero de la Granja Penal Gustavo André. Fuente de elaboración propia, 2022.

3.2 DESCRIPCIÓN DE LA PREPARACIÓN Y PASTEURIZACIÓN DEL SUSTRATO PROCESO PRODUCTIVO QUE SE REALIZA EN EL PENAL

El proceso productivo en el invernadero era realizado siguiendo las etapas apropiadamente para cumplir el proceso productivo del Hongo *Pleurotus Ostreatus* var. *Florinda Girgolas* para alcanzar la óptima producción y los estándares de comercialización. Tanto el director de proyecto, como personal del CCT y las PPL, se encargaban de ejecutar y supervisar el proceso.

Ahora bien, según Méndez, 2022 la etapa de preparación y pasteurización del sustrato del proceso productivo que se realiza en el penal se ejecutaba de la siguiente manera (ver figura N°29):

- 1) Primero se selecciona el sustrato que consiste en virutas de álamo blanco proveniente del aserradero que funciona en la Colonia y Granja del penal, como así también de aserraderos de la zona de Gustavo André y del Gran Mendoza.
- 2) Una vez que se tiene el sustrato para llenar 70 bolsas con 7kg de sustrato c/u, es decir, unos 490 kg aproximadamente; se procede a realizar una hidratación del mismo hasta alcanzar una humedad entre el 60% - 70% aproximadamente.
- 3) Luego el sustrato es colocado en el pasteurizador rotativo de acero inoxidable y se le añade agua caliente (3 baldes de 20 litros de agua caliente a 70°C en 50 kg de sustrato).
- 4) Se enciende quemador el quemador de la caldera de vapor, utilizándose un tubo de GLP de 45 kg. La caldera se arranca en 20 a 30 minutos, dependiendo si es verano o invierno, para que se caliente el agua y produzca el vapor necesario para el pasteurizador.
- 5) Posteriormente se procede a ejecutar la pasteurización durante máximo dos horas (1 vez a la semana), a una temperatura de 70°.
- 6) Posterior a la finalización de la pasteurización, se enfría el sustrato a una temperatura inferior a los 25°C, esto se realiza con un soplador eléctrico y se efectúa con el objetivo de evitar abortos de las semillas, el sustrato una vez pasteurizado tiene una vida útil de 80 a 90 días.
- 7) Posterior al enfriado, se continua el proceso con el resto de las etapas del proceso productivo del hongo. Vale recordar que estas son la siembra (previa obtención de semillas), incubación o colonización, inducción o fructificación, cosecha, secado, embalaje, almacenaje y venta.

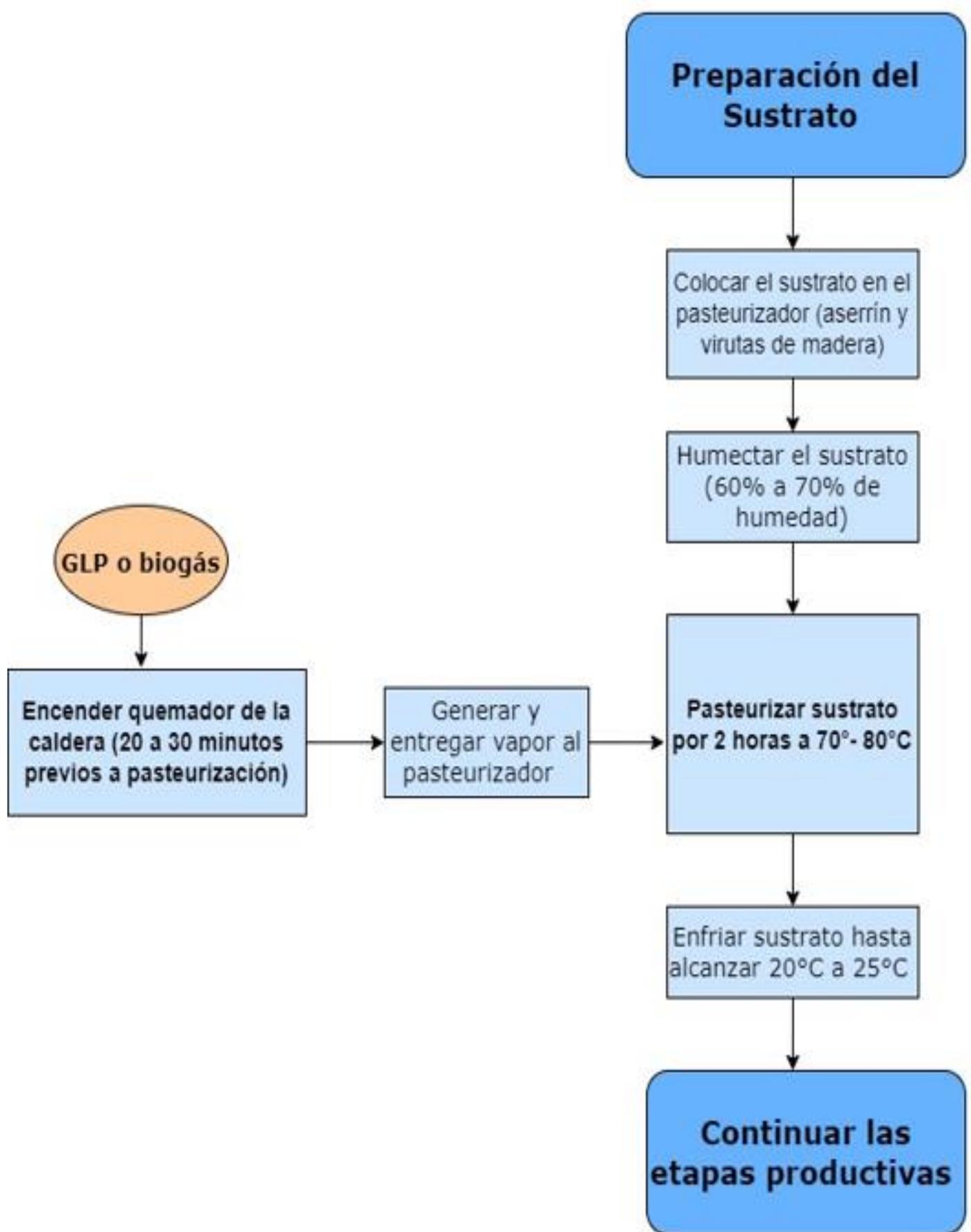


Figura N° 29: Etapa de preparación y pasteurización del sustrato en el Invernadero del Penal de Gustavo André. Fuente de elaboración propia, 2022.

3.3 DIAGNÓSTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL EN EL PENAL (CARACTERÍSTICAS, COMPOSICIÓN, PERIODOS Y FRECUENCIA DE GENERACIÓN, ETC.)

En junio del año 2022, se realizó una entrevista al Ingeniero Agrónomo Germán Millán, subdirector de la Colonia y Granja Penal Gustavo André. A partir de esta entrevista, se pudo obtener información relevante respecto de las actividades agropecuarias que se realizan en dicha colonia junto con los residuos que se generan.

Entre las actividades agropecuarias se encuentra que la producción caprina y ovina, como las más importantes. Posee 200 cabras y 50 ovejas, y ambos grupos de animales se encuentran en corrales y se los alimenta mediante pastoreo directo. Además, se está empezando con la cría de conejo, que al momento cuenta 15 ejemplares en jaulas.

Las cabras y ovejas se alimentan con alfalfa todo el año, con sorgo en verano y cebada en invierno. En el caso de los conejos estos se alimentan con alimento balanceado mezclado con alfalfa.

Como se mencionó, tanto las cabras como las ovejas se crían en corrales lo que genera que la mayor parte de sus desechos se depositen ahí, en forma diaria, y una (1) vez al año sean retirados. Según (Millán G., 2022) del total de dichos desechos el 90% se destina a la venta, siendo el momento de mayores ventas en otoño, y solo un 10% se destina abono.

Por otra parte, entre las actividades agrícolas de la Colonia y Granja, se realizan cultivos hortícolas y de pasturas para los animales de la granja. Como ya se mencionó el predio completo tiene 20 ha de superficie. Entre los cultivos de pasturas, se realiza siembra de alfalfa todo el año en la mayor superficie, en verano se siembran 5 hectáreas de sorgo y en invierno se siembra cebada en otras 5 hectáreas. Mientras tanto, como cultivos hortícolas en la colonia se cultivan 8 hectáreas de tomate, melón y sandía en 2,5 hectáreas c/u y zapallo en 3 hectáreas. Los desechos que se producen de la actividad agrícola se usan como abono verde y como alimento para los animales.

El subdirector destaca la rápida disponibilidad en que se encuentran los desechos de las cabras y de las ovejas al tenerlos en corrales. Además, considera que, aunque todo el guano y restos agrícolas no estén cuantificados y que actualmente se asigne a otros fines, la cantidad generada de desechos es suficiente para que una fracción se destine a producir biogás que sea útil en el proceso productivo de los Hongos Girgolas.

3.4 BIODIGESTOR INSTALADO EN EL PENAL DE GUSTAVO ANDRÉ

En el sector donde funciona la escuela se tiene ya instalado un biodigestor de mezcla completa, de alimentación semicontinua, que se encuentra semienterrado del lado oeste del galpón de producción del hongo Girgolas. Dicho biodigestor, tiene un volumen total de 2750 litros (2,75 m³), de los cuales 2000 litros son de volumen de reacción y los restantes 750 litros de espacio de acumulación interna de biogás.

Cuenta además con un acumulador de biogás externo (gasómetro) de 1000 litros y con un intercambiador de calor de tipo serpentín en el interior de mencionado biodigestor. Sin embargo, el biodigestor no cuenta con ningún tipo de aislamiento, ni tampoco tiene realizadas las conexiones hacia la caldera de vapor, ni el tanque acumulador; pero si se han dejado previstas las conexiones en el intercambiador de calor y una estructura de apoyo para una eventual instalación.

El intercambiador de calor que posee el biodigestor está diseñado para que transfiera el calor proveniente de un colector solar al sustrato. Actualmente, se encuentra instalado el colector solar desde finales del 2022 pero sin funcionamiento.



Figura N° 30 (Izquierda): Biodigestor (gris) con su gasómetro al costado(azul). Fuente elaboración propia, 2022.

Figura N° 31 (Derecho): Intercambiador de calor en forma de serpentín y hélice de mezcla. Fuente de elaboración propia, 2022.



Figura N° 32: Estructura de sostén del colector solar y su acumulador. Fuente de elaboración propia, 2022.

3.5 DATOS CLIMÁTICOS DE GUSTAVO ANDRÉ

Para obtener los datos climatológicos de la localidad de Gustavo André, se pudo acceder a la información recabada por la estación meteorológica que se halla en mencionada localidad y los datos recabados por la estación meteorológica más cercana perteneciente a localidad de Tres Porteñas del Departamento San Martín, que se halla a unos 27 km aproximadamente en dirección Sur. Los datos de la estación meteorológica de Tres Porteñas se utilizaron con un fin complementario a algunos datos faltantes de la estación de Gustavo André. Ambas son propiedad de la Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas (DACC).

El departamento de Hidrología perteneciente al Departamento General de Irrigación (DGI) de la provincia de Mendoza tiene acceso y suministro a la información climatológica de las dos estaciones meteorológicas de la DACC. Este mismo facilitó la información de las variables climáticas de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), velocidad de viento (m/s), radiación (W/m^2) y humedad (%) de ambas. Los datos climáticos obtenidos corresponden a una serie diaria de datos registrados entre los años 1998 – 2018, en las dos estaciones meteorológicas (Ver Figura N°33).

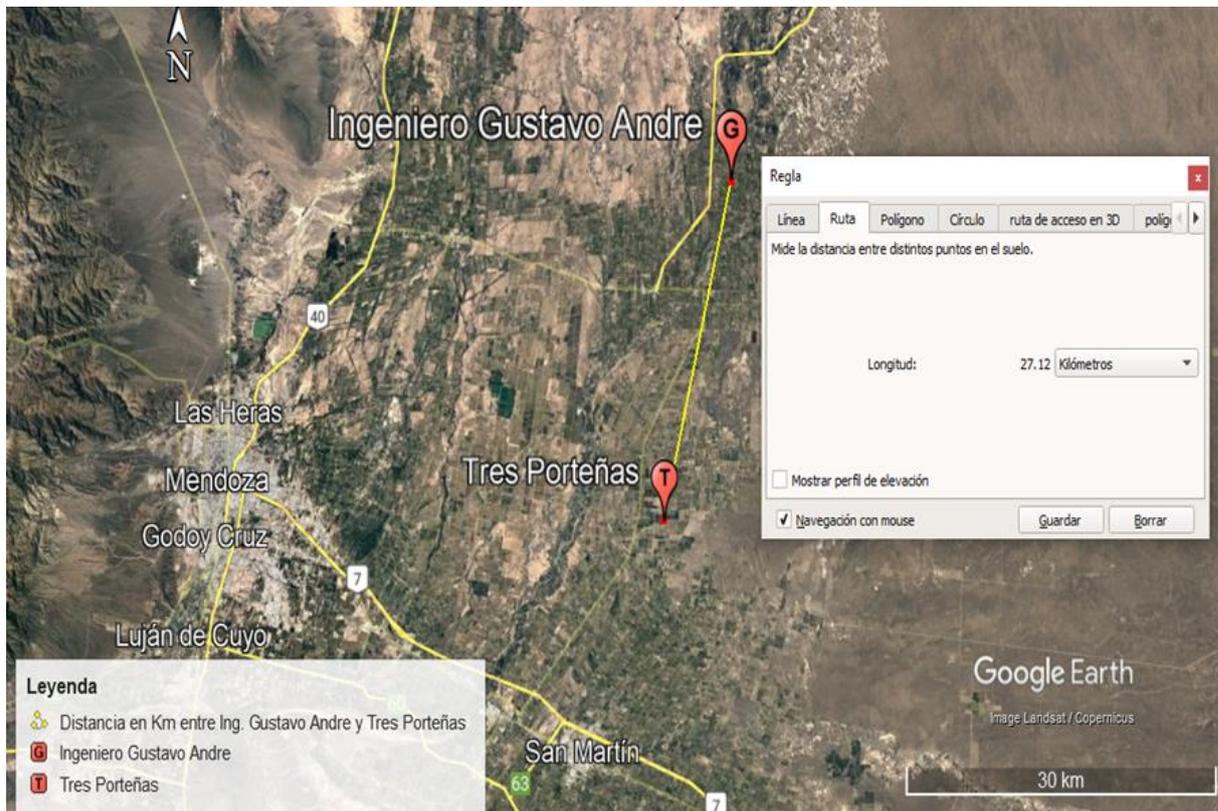


Figura N° 33: Imagen de Google Earth que muestra la distancia entre la Estación meteorológica de la localidad de Ingeniero Gustavo André y la estación meteorológica de la localidad de Tres Porteñas. Fuente de elaboración propia, 2022.

Según los datos procesados y analizados se pudo ver que para el periodo que comprende los años 1998-2018 en la localidad de Gustavo André y alrededores, se registró una temperatura media anual de $16,8^{\circ}\text{C}$. Para el invierno, la estación más fría del año, la media fue de $8,3^{\circ}\text{C}$, para el verano, la estación más cálida, fue de $24,9^{\circ}\text{C}$ y para las estaciones intermedias otoño-primavera la media fue de $17,2^{\circ}\text{C}$, (Ver tabla N°13).

La temperatura mínima media anual en todo el periodo ya mencionado fue de 8,9°C, siendo para el invierno de 0,4°C, para el verano de 16,8°C y para el periodo otoño-primavera de 9,6°C. En cuanto a la temperatura máxima media anual, se registró 25,6°C en todo el periodo (1998-2018), siendo para el verano de 33,5°C, el otoño-primavera de 25,7° y para el invierno de 17,8°C (Ver tabla N°13).

Tabla N° 13: Temperaturas registradas en la estación meteorológica de Gustavo André y alrededores (1998- 2018). Fuente: Elaboración propia, 2022.

ANÁLISIS DE VARIABLES CLIMATOLÓGICAS DE GUSTAVO ANDRÉ Y ALREDEDORES	
PERIODO TOTAL (1998- 2018)	TEMPERATURA (°C)
Temperatura máxima media	25,6
Temperatura media	16,8
Temperatura mínima media	8,9
Verano (1998-2018)	
Temperatura máxima media	33,5
Temperatura media	24,9
Temperatura mínima media	16,8
Invierno (1998-2018)	
Temperatura máxima media	17,8
Temperatura media	8,3
Temperatura mínima media	0,4
Otoño -Primavera (1998 -2018)	
Temperatura máxima media	25,7
Temperatura media	17,2
Temperatura mínima media	9,6

La radiación para la zona de Gustavo André y alrededores, para el periodo de 1918-2018, registro un valor anual promedio de 5051,64 Wh/m²*día. En tanto para el verano la radiación solar se ubica alrededor de los 7066,91 Wh/m²*día y para el invierno ronda valores alrededor de 3170 Wh/m²*día (Ver tabla N°14).

Tabla N° 14: Radiación solar (Wh/m² * día) registrados en la localidad de Gustavo André y alrededores periodo (1998-2018). Fuente: Elaboración propia, 2022.

ANÁLISIS DE VARIABLES CLIMATOLÓGICAS DE GUSTAVO ANDRÉ Y ALREDEDORES	
PERIODO 1998-2018	
RADIACIÓN	PROMEDIO
Periodo Total (Wh /m ² *día)	5051,64
Verano (Wh /m ² *día)	7066,91
Invierno (Wh /m ² *día)	3170,80
Otoño - Primavera (Wh/m ² *día)	5039,75

La velocidad del viento media anual que tuvo en la localidad de Gustavo André para el periodo ya mencionado, fue de 1,33 m/s, equivalente a unos 4,78 km/h (Ver tabla N°15).

Tabla N° 15: Velocidad de viento media registrada en la localidad de Gustavo André y alrededores.
Fuente: Elaboración propia, 2022.

ANÁLISIS DE VARIABLES CLIMATOLÓGICAS DE GUSTAVO ANDRÉ Y ALREDEDORES	
PERIODO 1998 - 2018	
VIENTO	PROMEDIO(m/s)
Periodo Total	1,33

El porcentaje de humedad relativa ambiente (%) registrado por su parte para el periodo comprendido del sitio fue de unos 48,17%, con escasas variaciones interestacional (Ver tabla N°16).

Tabla N° 16: Porcentaje de humedad (%) registrados en la localidad de Gustavo André y alrededores, 2022. Fuente: Elaboración propia, 2022.

ANÁLISIS DE VARIABLES CLIMATOLÓGICAS DE GUSTAVO ANDRÉ Y ALREDEDORES	
PERIODO 1998-2018	
% HUMEDAD	PROMEDIO
Período Total	48,17
Verano	42,91
Invierno	52,89
Otoño- Primavera	48,40

4. BALANCE DE MASA Y ENERGÍA

4.1 MASA DE ESTIÉRCOL Y POTENCIAL ENERGÉTICO

A partir de conocer que la cantidad de cabras es de 200 ejemplares y de ovejas 50 ejemplares, así como que la masa de estiércol diaria producida por cada especie es según (Bartucci L.S y col., 2020) de 1,5 kg por cabra y de 2 kg por oveja; se procede a calcular la masa de estiércol diaria total que se genera en la granja utilizándose la ecuación N°1. Luego, se calcula la masa anual de estiércol que se genera por año anual (kg estiércol/año) al multiplicar la masa total diaria de estiércol por el valor de 365 días del año.

- Masa de Estiércol Cabra (kg/día) = 200 cabras * 1,5 kg de estiércol/cabra * día = **300**

- Masa de Estiércol Oveja (kg/día) = 50 ovejas * 2 kg de estiércol/oveja * día = **100**

- **Masa de Estiércol Total (kg/día) = Cabra + Oveja = 400**

- **Masa Estiércol Total (kg/Año) = 146.000**

Entre cabras y ovejas se producen diariamente 400 kg de estiércol, lo que equivale a una cantidad total anual de 146.000 kg.

Los guanos de cabra y oveja poseen características particulares que deben ser consideradas para los cálculos. Estas se presentan en la siguiente tabla, basada en los estudios realizados por Bartucci y col. (2020) y Martí Herrero y col. (2019).

Tabla N° 17: Características del guano de Cabra y Oveja. Fuente: Elaboración propia, basado en estudio realizado por (Bartucci L.S y col., 2020) y en (Martí Herrero y col., 2019).

ANIMAL	kg estiércol /animal*día	Sólidos totales (% de ST)	Sólidos Volátiles (% SV) en base húmeda
Cabra	1,5	82	57,4
Oveja	2	32	22,4

A partir de los valores de masa de estiércol producido por los animales (cabra y oveja) y el porcentaje de sólidos volátiles (% SV) en base húmeda de cada estiércol, se puede obtener la masa de sólidos volátiles (kg de SV) generados diariamente por cada animal de la especie, utilizando la ecuación N°2.

• Masa SV cabra = 1,5 (kg de estiércol/cabra * día) * 57,4 % de SV base húmeda = **0,861** (kg SV/cabra * día)

• Masa SV oveja = 2 (kg de estiércol/oveja * día) * 22,4% de SV base húmeda = **0,448** (kg SV/oveja * día)

Teniendo en cuenta la cantidad de sólidos volátiles (SV) producidos diariamente por animal (kg SV /animal * día) para cada especie, y considerando que ambos estiércoles tienen una producción de metano (CH₄) de 0,25 m³ de CH₄ / kg de SV en CNPT (1atm y 15°C) según Manrique y col., 2015, Además de que la densidad del gas metano (CH₄) es de 0,67 Kg/m³ en CNPT (1atm y 15°C) (Manrique, 2015). Se procede a calcular el índice de producción de metano (IPM) para cada especie (Ecuación N°3).

- IPM Cabra (kg CH₄/cabra*año) = 0,861*0,25*0,67*365 = **52,64**
- IPM Oveja (kg CH₄/oveja*año) = 0,448*0,25*0,67*365 = **27,39**

Finalmente, una vez obtenido el Índice de Producción de Metano (IPM) para cabra y oveja, conociendo la cantidad (Q) de animales de estas dos especies en la granja del penal (200 cabras y 50 ovejas) y suponiendo un Poder Calorífico Inferior del Metano (CH₄) de 50,2 MJ/kg, se procede a calcular el Potencial Energético (PE) de los residuos de guano de cabra y oveja que se generan en la Granja Penal de Gustavo André. Para ello, se aplica la ecuación N°4.

- PE (MJ/año) CABRA = 200 *52,64*50,2 = **528.499,45**
- PE (MJ/año) OVEJA = 50*27,39*50,2 = **68.747,90**
- PE TOTAL ANUAL (MJ/año) = **528.499,45 + 68.747,90 =**
- **PE TOTAL ANUAL (MJ/año) = 597.247,35**
- PE TOTAL DIARIO (MJ/día) = **597.247,35 MJ/AÑO / 365 días/año =**
- **PE TOTAL DIARIO (MJ/día) = 1.636,29**

La cantidad total de estiércol producida diariamente entre cabras y ovejas en el penal (400 kg) tiene un potencial energético diario de 1636,29 MJ, que asciende a 597.247,35 MJ por año.

Lo anterior, es considerando que el 100% del estiércol generado por los animales podría aprovecharse y descartando otro tipo de condiciones como los días en los que los animales no están en corral o los momentos en los que se mezclan con impurezas y tierra, que no lo hacen apto para la biodigestión. También, suponiendo que el biodigestor tiene un rendimiento de producción de biogás del 100% al igual que el supuesto quemador o sistema de aprovechamiento de ese biogás con otro 100%.

4.2 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Como se ha mencionado anteriormente, en el Penal de Gustavo André se encuentra un biodigestor enterrado que tiene un volumen total de 2,75 m³ (2750 litros). Para conocer la carga diaria que se debe incorporar al biodigestor del penal, es necesario definir primero una temperatura de operación del mismo.

Se pretende que el biodigestor opere durante todo el año a una temperatura de 25°C esto porque es la temperatura más elevada del rango psicrófilo y por lo tanto la que mayor producción de biogás generara de ese rango. No obstante, es una temperatura que resulta adecuada para minimizar el contraste térmico con la temperatura del suelo que se mantiene constante alrededor de los 16°C⁷ en esta zona y con la que se puede reducir el costo de mantenimiento de la temperatura de operación.

Previamente definida la temperatura de operación, se procede a calcular el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) usando la ecuación N°5 desarrollada por Mazeh y col. 2022. Entonces, resolviendo la ecuación para una temperatura (T) de funcionamiento del Biodigestor de 25°C nos da:

- $TRH = -51,227 * LN(25) + 206,72$

- $TRH = 41,69$

- **$TRH = 42$ días**

Redondeado, se necesita un Tiempo de Retención Hidráulico (THR) de 42 días a una temperatura de 25°C. Una vez obtenido el THR y conociendo el volumen de reacción del biodigestor (2m³), se procede a calcular la carga diaria del mismo. Esto se realiza siguiendo la ecuación N°6 establecida por la FAO (2011).

- $Carga\ diaria\ (m^3/día) = 2\ m^3 / 42\ días$

- **$Carga\ diaria\ (m^3/día) = 0,048\ m^3\ mezcla\ de\ alimentación\ /\ día$**

La carga diaria a aplicar al biodigestor será de 0,048 m³ mezcla de alimentación / día o el equivalente a 48 litros de mezcla de alimentación / día. Los dos sustratos para la biodigestión, estiércol de cabra y estiércol de oveja, se utilizarán en partes iguales. El estiércol de cabra tiene una relación C: N de 40:1, mientras que el estiércol de oveja una relación de 35:1 (FAO, 2011). La mezcla de ambos sustratos, en partes iguales, generará una relación C:N de 37,5:1, que resulta adecuada para la biodigestión, ya que permitirá un proceso prolongado y controlado.

Al observar la Tabla N° 17, se puede concluir que el estiércol de cabra y de oveja difieren en el contenido de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (% en base húmeda). El estiércol de cabra presenta un contenido de 82% de ST y 57,4% de SV en base húmeda, mientras que el estiércol de oveja presenta un 32% de ST y un 22,4% de SV en base húmeda.

Con el valor de Sólidos Totales (% ST) de ambos estiércoles, podemos saber que el valor ponderado de Sólidos Totales (% ST) que tendrá nuestro co-sustrato es de 57%. Este valor resulta de una mezcla de ambos estiércoles en partes iguales. Según la (FAO y col., 2011) la mezcla que ingresa al biodigestor no debe tener un contenido de Sólidos Totales (% de ST) superior al 8 %. Si este valor es superado se debe diluir la mezcla con agua. Para saber la cantidad de agua necesaria para diluir la mezcla se aplica la ecuación N°7.

- $0,08 = (1 * 0,57) / (1+W)$

- $0,08 * (1+W) = (1 * 0,57)$

⁷ <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/ladyot/catalogo/cdandes/cap06.htm>

- $0,08 + 0,08W = 0,57$
- $0,08W = 0,57 - 0,08$
- $W = 0,49 / 0,08$
- **W = 6,125 Litros de agua / kg de co-sustrato**

Para garantizar un contenido de sólidos totales (%ST) menor al 8%, se debe añadir 6,125 litros de agua por cada kilogramo de mezcla fresca de co-sustrato. Esto significa que, si se deben añadir 48 litros de mezcla de alimentación al biodigestor, se necesitan que 7,8 kg de co-sustrato al día sean diluidos en agua en una relación sustrato - agua de (1:6) aproximadamente. Los 7,8 kg de co-sustrato por día utilizados apenas representan un 2% de los 400 kg de excreta diarios producidos por oveja y cabra en la granja.

De acuerdo a Manrique y col. (2015), cada tipo de estiércol animal es capaz de generar una determinada cantidad de biogás. Por ejemplo, para cabra se estima que la producción de biogás alcanza los 60 litros en CNPT por cada kg de estiércol (0,06 Nm³ biogás / kg de estiércol). Por su parte, para oveja, se encuentra entre los 50 litros en CNPT por kg de estiércol (0,05 Nm³ biogás / kg de estiércol). (Ver tabla N°17). Como el co-sustrato está conformado por ambos estiércoles en proporciones iguales, se supone una producción estimada de 55 litros de biogás en CNPT por kg de co-sustrato (Nm³ biogás / kg de estiércol).

Teniendo en cuenta que el co-sustrato de la granja es capaz de producir 0,055 Nm³ de biogás por kg de co-sustrato, la cantidad de biogás diario (Nm³ biogás/día) que produciría el biodigestor de la granja del penal a 25°C de operación se estima en 0,429 Nm³ biogás/día.

- $7,8 \text{ kg de co-sustrato / día} * 0,055 \text{ Nm}^3 \text{ biogás / kg de co-sustrato} = \mathbf{0,429 \text{ Nm}^3 \text{ biogás/día.}}$

Sabemos que el biogás puede producirse a partir de diversos residuos, siendo su contenido de metano (CH₄) variable. Por ejemplo, el guano de cabra genera un biogás con un 62,7 % de contenido de metano (Magaña y col., 2006) mientras que el guano de oveja genera un biogás con un 63 % de metano (CH₄) (Hilbert y col., 2011).

Tomando en consideración que el co-sustrato está conformado en partes iguales por ambos estiércoles y con el objetivo de evitar sobreestimación, se decide considerar un contenido de metano (CH₄) de 60% para el biogás producido. Esto arroja que de los 0,429 Nm³ de biogás por día, se producen 0,257 Nm³ de CH₄.

Según Manrique (2015) y Martí Herrero (2019), el biogás compuesto por un 60% de metano (CH₄) posee un poder calorífico de 21,6 MJ/Nm³, lo que equivale a 6,06 kWh/Nm³ de biogás. Sabiendo que en se producirán 0,429 Nm³ de biogás/día, entonces podemos conocer la cantidad de energía que se producirá diariamente.

- $0,429 \text{ Nm}^3 \text{ de biogás/día} * 21,6 \text{ MJ/Nm}^3 \text{ biogás} = \mathbf{9,27 \text{ MJ/día}}$

Los 9,27 MJ/día de energía producidos por la biodigestión corresponden al 0,56% de los 1639,29 MJ/día que se podrían obtener si se destinara y aprovechara el 100% el estiércol de cabra y oveja mediante un biodigestor de gran tamaño.

4.3 DEMANDA ENERGÉTICA DEL PROCESO DE PASTEURIZACIÓN

El proceso de pasteurización de cultivo de hongo gírgolas llevado a cabo en el penal de Gustavo André involucra un pasteurizador rotativo de 1000 litros o 1m³, el cual realiza la pasteurización por contacto directo con el vapor. La caldera de 125 litros o 0,125m³, que genera el vapor, es calentada por garrafas de GLP (Gas Licuado de Petróleo) con un quemador de 14 cm de diámetro y una presión constante.

Para calcular la demanda energética del proceso de pasteurización, es necesario conocer el combustible utilizado para calentar el agua de la caldera y generar el vapor que utiliza el pasteurizador. De acuerdo con Méndez (2022), una garrafa de GLP de 45 Kg es suficiente como fuente de energía para la caldera y rinde aproximadamente 7 pasteurizaciones. Así mismo, se señala que la pasteurización se realiza una vez por semana durante 2 horas y media.

Entonces:

Ecuación N° 8: Cantidad de GLP por pasteurización.

$$\text{kg de GLP / Pasteurización} = \text{kg de GLP} / \text{Cantidad de pasteurizaciones}$$

- 45 kg de GLP / 7 pasteurizaciones = **6,43 kg de GLP/ Pasteurización**

Es fundamental conocer las características del tubo de GLP de 45 kilogramos comercializado por YPF S.A. Se trata de Propano comercial, que medido en CNPT (1 atm y 15°C), presenta un Poder Calorífico Inferior (PCI) de 11.000 kcal/kg y un Poder Calorífico Superior (PCS) de 11.900 kcal/kg. Además, posee un punto de ebullición a presión atmosférica de -42°C y una densidad de líquido 515 kg/m³.

*Tabla N° 18: Propiedades del Propano comercial de YPF S.A. medido en CNPT (1 ATM Y 15°C).
Fuente: Elaboración propia, 2022 basado en información de YPF S.A. (7).*

Punto de ebullición a presión atmosférica	-42°C
Poder calorífico inferior (PCI)	11.000 kcal/kg
Poder calorífico Superior (PCS)	11.900 kcal/kg
Densidad de líquido	515 kg/m ³

A partir de la información de que se utilizan 6,43 kg de garrafa de GLP por pasteurización y de que el propano comercial involucrado en la calefacción de la caldera tiene un Poder Calorífico Inferior (PCI) de 11.000 kcal/kg, se puede calcular la cantidad de energía que se necesita en cada pasteurización expresadas en kilocalorías (kcal).

Ecuación N° 9: Energía por pasteurización (kcal/pasteurización).

$$\text{kcal/Pasteurización} = (\text{kg de GLP} / \text{Pasteurización}) / \text{PCI del GLP (kcal/kg)}$$

- 6,43 kg de GLP /pasteurización * 11.000 kcal/kg = **70.714 kcal / pasteurización**

Cada pasteurización actualmente demanda 70.714 kcal/ pasteurización. Expresando lo anterior en unidades de potencia, se procede a calcular la cantidad de energía térmica a incorporar al proceso por unidad de tiempo. Como se sabe, cada pasteurización tiene una duración total de 2,5 horas; por lo que la potencia a entregar en kcal/hora es de 28.286 kcal/hora.

- $70.714 \text{ (kcal/pasteurización)} / 2,5 \text{ (hora/pasteurización)} = \mathbf{28.286 \text{ kcal/ hora}}$

De los datos anteriores, se procede a calcular la cantidad de Biogás (Nm³) que se debería aportar por hora al proceso de pasteurización. Esto va a venir dado por la siguiente ecuación N°10.

Ecuación N° 10: Biogás por hora de pasteurizado.

$$\mathbf{Nm^3 \text{ biogás / hora} = (\text{kcal/hora} * \text{pasteurización}) / (\text{kcal/Nm}^3 \text{ de biogás con 60\% de CH}_4)}$$

- $28286 \text{ (kcal/hora)} / 5212,62 \text{ (kcal/Nm}^3 \text{ biogás con 60\% de CH}_4) = \mathbf{5,43 \text{ Nm}^3 \text{ biogás /hora}}$

Para saber la cantidad de biogás que necesita la pasteurización completa, se debe considerar que esta demora 2,5 horas en total. Entonces a partir de esto tenemos:

- $5,43 \text{ Nm}^3 \text{ biogás / hora} * 2,5 \text{ horas/pasteurización} =$

**13,58 Nm³ biogás/
pasteurización**

Para satisfacer la demanda total de energía que requiere el proceso de pasteurización en las del Hongo *Girgolas Pleurotus Ostreatus* var. *Florinda Girgolas*, condiciones actuales de la caldera sin aislamiento, se necesitan producir 13,58 Nm³ de biogás.

5. PROPUESTAS DE MEJORAS

5.1 PROPUESTAS DE MEJORA CALDERA

La caldera carece de aislamiento, por lo que es necesario colocar lana de vidrio alrededor de ella para reducir las pérdidas térmicas y ahorrar energía durante el proceso de pasteurización. Para determinar el espesor de aislante que ofrece la mayor reducción de pérdidas térmicas, se propone evaluar el comportamiento térmico de la caldera sin aislante y con diferentes espesores de aislante. Para esto, se recomienda utilizar el software SIMUSOL, el cual permite simular el comportamiento térmico y flujo de transferencia de calor (W). De esta forma, se podrá obtener el mejor espesor de aislante para lograr una mayor eficiencia energética.

Para poder realizar la simulación, en el programa se debe armar un modelo esquemático que muestre los procesos de transferencia de calor involucrados en la caldera, tanto sin aislamiento como con aislamiento. Además de los modelos se debe conformar tablas donde se coloquen todos los datos necesarios para ejecutar la simulación Anexo VI).

Las tablas a armar en el programa deben ser, una "INICIALES" con las condiciones iniciales necesarias para la simulación, como la temperatura del agua de la caldera, otra tabla "TIEMPO" con el tiempo a considerar en la simulación y otra denominada "DATOS" donde se colocan las resistencias de transferencia de calor involucradas, junto con la fuente de calor y temperatura del medio exterior. Además, se debe elaborar una tabla "PARÁMETROS", donde se involucran las dimensiones del elemento a simular, como la caldera, con los diferentes materiales, con sus respectivos espesores, temperaturas, coeficientes de conductividad (k), emisividad (e) y coeficientes convectivos (h). Vale aclarar, que en el Anexo IV, solo se muestra un modelo esquemático para la caldera con aislante de lana de vidrio de 2,5 cm de espesor, sin embargo, se debe modificar el espesor del aislante de lana de vidrio denominado "EspLana" previo a una simulación con cada tipo de espesor.

No obstante, los coeficientes convectivos (h) de los materiales involucrados deben ser calculados mediante el uso de la metodología planteada por Incropera y col. (1999) en el capítulo 7 y a (Mejía, 2022), tanto para la convección natural como para la convección forzada (ver Anexo I "Cálculo del coeficiente convectivo h para la caldera sin aislamiento" y Anexo II "Cálculo del coeficiente convectivo h para la caldera con aislamiento"). Una vez calculados, los datos obtenidos deben ser introducidos en los modelos de transferencia de calor para simular el comportamiento térmico y el flujo de transferencia de calor (W) de manera dinámica.

5.1.1 DEMANDA ENERGÉTICA DE LA CALDERA AISLADA

La simulación del proceso de transferencia de calor que tiene lugar en la caldera sin aislamiento y con aislamiento, asume previamente algunos supuestos como: un flujo laminar y estado estacionario de aire dentro del invernadero, una condición de 10°C o 283 K dentro del invernadero en los periodos más fríos del año (Méndez, 2022), y una temperatura de operación de la caldera de 96°C (Anexo IV).

La simulación realizada primero sobre la caldera sin aislar indicó que se tiene una potencia de pérdida de calor de 1.405 W , o el equivalente a $1,41\text{ kW}$, cuando la caldera ya

entro en régimen de producción de vapor, y que dicha potencia de pérdida es netamente del tipo “convectivo-radiante”. Si se considera que el proceso total dura en total 2,5 horas, desde que empieza a calentar el agua (calor sensible) hasta que produce vapor (calor latente) y mantiene esa producción de vapor por las 2 horas que precisa de pasteurización del sustrato, esto significa que hay unas pérdidas energéticas por transferencia de calor de 3,525 kWh (Anexo V).

Luego de realizar la simulación para la caldera sin aislar, se debe realizar simulaciones para los distintos espesores comerciales de lana de vidrio para observar y comparar cuál sería el espesor adecuado para colocar en la caldera con el objetivo de reducir las pérdidas de calor. Esto se logró a evaluar las pérdidas energéticas que presentaban cada espesor (Anexo V).

Tabla N° 19: Pérdidas de calor (kW), % de reducción de pérdidas energéticas para cada tipo de espesor comercial de lana de vidrio respecto a la caldera sin aislar. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

CALDERA	POTENCIA (kW)	ENERGIA (kWh) (Potencia * 2,5h)	% REDUCCION DE PERDIDAS
Sin aislamiento	1,41	3,525	0%
2,5 cm de Lana	0,16	0,40	89 %
5 cm de Lana	0,07	0,18	95%
8 cm de Lana	0,05	0,12	97%
10 cm de Lana	0,04	0,09	97%

A partir de la tabla, se puede observar que, al aislar la caldera con lana de vidrio de 2,5 cm de espesor, se reducen significativamente las pérdidas energéticas de la caldera durante el proceso, pasando de 3,525 kWh a 0,4 kWh, una reducción del 89% bajo las condiciones de invernadero mencionadas. Además, se puede apreciar que el incremento del espesor aislante no mejora significativamente la reducción de pérdidas térmicas. Por tanto, aplicar un espesor de 2,5 cm resulta apropiado desde un punto de vista técnico y económico.

Si se realiza una comparación entre las pérdidas energéticas entre la caldera sin aislar y con caldera aislada, se puede conocer el ahorro en energía que se obtiene.

- **Ahorro en kWh = kWh caldera sin aislar – kWh caldera aislada**

- **3,525 kWh – 0,4 kWh = 3,125 kWh**

Como 1kWh = 3600 kJ y 1kcal = 4,1868 kJ; entonces 3,125 kWh = 2687 kcal que representa las pérdidas energéticas que se conseguirán ahorrar en las 2,5 horas que dura el proceso.

- **70.714 kcal necesarias para caldera sin aislar – 2.687 kcal ahorradas =**

68.027 kcal

La demanda total de la caldera sin aislar es de 70.714 kcal. Al aplicar el aislante, las pérdidas disminuyen en 2.687 kcal, por lo que la demanda total de la caldera con aislante es de 68.027 kcal. Si dividimos ese ahorro por el Poder Calorífico Inferior (PCI) del GLP, obtenemos un ahorro de 0,25 kg del mismo. Por lo tanto, se consumirían 6,18 kg de GLP con la caldera aislada por pasteurización.

- **2.687 kcal / 11.000 kcal/kg = 0 ,25 kg de garrafa ahorrados.**

- 6,43 kg de GLP de la garrafa sin aislante – 0,25 kg de GLP ahorrados = **6,18 kg de GLP con caldera aislada.**

5.1.2 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA CALDERA AISLADA

Al evaluar el ahorro económico que se consigue con aislar la caldera hay que tener en cuenta que el GLP posee un Poder Calorífico Inferior (PCI) de 11.000 kcal/kg, por lo que una garrafa de 45 kg tendría un contenido energético de 495.000 kcal.

Desde un punto de vista económico, la carga de una garrafa de GLP de 45 kg tiene un costo de \$ 12.000 pesos (55,81 dólares) según Akitom S.A.⁸ Distribuidor oficial YPF S.A. a fecha 10 de marzo del año 2023, por lo que 1 kg de GLP tendría un costo aproximado de \$ 267 pesos o de 1,24 dólares según cotización dólar oficial del Banco Central República Argentina⁹ del 31 de marzo del 2023 (215,00 Pesos argentinos / US\$).

Si se anualiza con las 52 pasteurizaciones que se realizan al año representa un ahorro de 3471 pesos argentinos o de 16,14 dólares⁽⁹⁾, con el solo hecho de aislar la caldera con 2,5 cm de espesor de lana de vidrio.

No obstante, se debe saber el costo de colocar la lana de vidrio de 2,5 cm de espesor, en una caldera que posee una altura de 1 metro y una superficie de 1,50 m². En Mercado Libre, se consigue una placa de lana de vidrio de 25 cm de espesor, 0,60 m de ancho y 1,20 m de largo (Total 0,72 m²) a un precio de 2.387,70 pesos argentinos, equivalente a 11,10 dólares, según cotización dólar oficial del Banco Central República Argentina del 31 de marzo del 2023 (215,00 Pesos argentinos / US\$). Como las dimensiones de la caldera exceden el área de la placa, serían necesarias dos placas idénticas, lo que hace que el costo de aislamiento ascienda a 4.777,54 pesos o 22,21 dólares.

Si dividimos el ahorro anual (3471 pesos argentinos o de 16,14 dólares), por aplicar 2,5 cm de espesor de lana de vidrio como aislante, y el costo por colocar ese aislante obtenemos un período de recuperación simple de la inversión (TRI) de 1,4 años. Lo cual hace que colocar lana de vidrio como aislante sea viable técnica y económicamente.

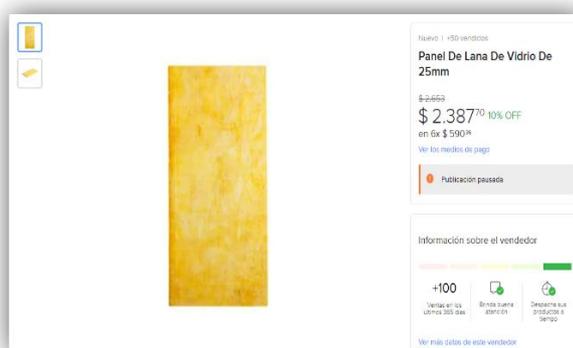


Figura N° 34: Placa de Lana de Vidrio de 25 cm de espesor para aislamiento de la caldera. Fuente: Mercado Libre, 2023.

⁸ <https://akitom.com.ar/producto/cilindro-de-45-kg/>

⁹ https://www.bcra.gob.ar/MediosPago/Tipos_de_Cambio_SML.asp

5.1.3 DEMANDA ENERGÉTICA DE LA CALDERA AISLADA Y CALEFACCIONADA CON BIOGÁS

A partir de la demanda de 68.027 kcal de la caldera con aislamiento, se puede estimar la cantidad de biogás (Nm³) necesaria para satisfacer dicha demanda. El biogás obtenido en el penal tendría una composición del 60% de metano (CH₄) en CNPT y, por lo tanto, un poder calorífico de 5212,65 kcal/Nm³ (ver tabla N°11).

- 68.027 kcal de la caldera aislada / 5212 kcal/Nm³ biogás = **13,05 Nm³ de biogás**

- 13,05 Nm³ de biogás / 7 días = **1,86 Nm³ biogás/día**

Se requieren 13,05 Nm³ de biogás para satisfacer la demanda energética total de la caldera aislada. Puesto que la caldera necesita del biogás solo una vez por semana, el biogás que produzca diariamente el biodigestor debería ser de 1,86 Nm³. Sin embargo, el biodigestor, si se opera a una temperatura de 25°C, solo será capaz de producir 0,429 Nm³ de biogás por día. Por lo tanto, es necesario almacenar el biogás en un gasómetro de manera apropiada para satisfacer la demanda energética total de la caldera aislada.

- 0,429 (Nm³ biogás/día) / 1,86 (Nm³ biogás/día) * 100 = **23%**

El biogás que se produzca diariamente representa solo un 23% del total requerido para cubrir la demanda térmica diaria de la caldera aislada (1,86 Nm³ biogás/día). Si se logra reemplazar ese 23% de la demanda total de la caldera con aislamiento (68.027 kcal) con biogás, se ahorrarían 15.646 kcal adicional en la utilización de GLP como medio de calefacción.

5.1.4 ANALISIS ECONOMICO DEL AISLAMIENTO DE LA CALDERA Y CALEFACCION CON BIÓGAS

Como ya se mencionó, si se reemplaza solo el 23% de demanda total de la caldera con aislamiento con todo el potencial biogás que se estima producir, se ahorrarían 15.646 kcal adicional de GLP diariamente. Por lo tanto, si se divide ese ahorro por el Poder Calorífico Inferior (PCI) del GLP, obtenemos un ahorro adicional de 1,42 kg del mismo. Por lo tanto, con la caldera aislada y calefaccionada con biogás se consumirían 4,76 kg de GLP por pasteurización.

- 15.646 (kcal) / 11.000 (kcal/kg) = **1,42 Kg de GLP / pasteurización con biogás en caldera aislada**

- 6,18 kg de GLP / pasteurización con caldera aislada – 1,42 kg de GLP ahorrados / pasteurización con biogás = **4,76 kg de GLP caldera aislada, con el aporte de un 23 % de biogás**

Reemplazar 1,42 kg de GLP en la pasteurización con biogás en la caldera con aislamiento permitiría ahorrar 379,14 pesos o 1,76 dólares por cada pasteurización. Si se

anualiza, realizando 52 pasteurizaciones por año, se obtendría un ahorro de 19.715 pesos o 91,69 dólares al año.

- 1,42 kg de GLP ahorrados /pasteurización con biogás * 267 \$ / kg de GLP) = 379,14 \$ ahorrados / pasteurización con biogás en caldera sin aislar, equivalente a 1,76 US\$ ahorrados / pasteurización con biogás en caldera aislada
- 379,14 \$ ahorrados / pasteurización con biogás * 52 pasteurizaciones / año =

19.715,28 pesos argentinos ahorrados anualmente, equivalente a 91,69 dólares

Si se considera el ahorro anual de 3.471 (16,14 dólares) pesos que se obtiene por aislar la caldera con lana de vidrio de 2,5 cm de espesor, y se suma los 19.715,28 (pesos que se ahorran al reemplazar un 23% de la demanda de energía de la caldera con biogás, se obtiene un ahorro total de 23.186,28 pesos argentinos, equivalente a 107,84 dólares anuales.

- 19.715,28 pesos ahorrados (91,69 dólares) / pasteurización con biogás en caldera aislada + 3471 pesos argentinos (16,14 dólares) / año con caldera aislada =

23.186,28 pesos argentinos ahorrados anualmente, equivalente a 107,84 dólares

5.1.5 DISMINUCIÓN DE GEI POR LA IMPLEMENTACIÓN DE BIOGÁS

Lograr cubrir el 23% de la demanda energética de la caldera aislada con biogás genera una reducción significativa de la emisión de CO₂eq. Esto se debe a que el biogás posee un factor de emisión prácticamente nulo, comparado con el GLP (Gas Licuado del Petróleo) que posee un alto factor de emisión de CO₂ (IPCC “Intergovernmental Panel on Climate Change”, 2006 citado en Guisasola,2022). El cálculo se realiza considerando un factor de emisión para el GLP por defecto de 63.100 kg de CO₂eq/TJ para la industria manufacturera (IPCC, 2006 citado en Guisasola,2022). El CO₂ liberado en la combustión de la digestión anaeróbica, no es tenido en cuenta, ya que se trata de energía proveniente de la biomasa (Guisasola,2022). Esto conlleva a una reducción significativa en la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera, debido a la fijación previa del mismo.

Para poder estimar la cantidad de GEI no emanado por reemplazo energético; simplemente, se debe considerar el valor energético de GLP que es utilizado en cada pasteurización con caldera aislada; y a este valor se lo multiplica por el porcentaje de reemplazo que realiza el biogás a una caldera con aislamiento. Este valor, al ser multiplicado por su factor de emisión, expresa la cantidad de CO₂ evitadas de emisión por la utilización del biogás.

- **Factor de Emisión GLP: 1 Terajoule (TJ) de GLP emite 63.100 kg de CO₂Eq**
- $(70.714 \text{ kcal} / \text{pasteurización}) * (4.184 \text{ Joules} / \text{kcal}) * (1\text{TJ} / 10^{(12)} \text{ J}) * (63.100 \text{ kgCO}_{2\text{eq}} / \text{TJ}) =$ **18,67 kg de CO₂eq**

$$- 18,67 \text{ kg de CO}_{2\text{eq}} * 52 \text{ semanas / año} = \boxed{970,84 \text{ kg de CO}_{2\text{eq}} / \text{año}}$$

Por cada pasteurización, con la caldera sin aislar y utilizando GLP como fuente de energía, se emiten 18,67 kg de CO_{2eq}. Si se anualizan estas emisiones y se sabe que la pasteurización se realiza una vez por semana, la cantidad de CO_{2eq} emitida al año es de 970,84 kg.

$$- (68.027 \text{ kcal de la caldera aislada / pasteurización}) * (4.184 \text{ Joules / kcal}) * (1\text{TJ} / 10^{12} \text{ J}) * (63.100 \text{ kgCO}_{2\text{eq}} / \text{TJ}) = \boxed{17,96 \text{ kg de CO}_{2\text{eq}}}$$

$$- 17,96 \text{ kg de CO}_{2\text{eq}} * 52 \text{ semanas / año} = \boxed{933,91 \text{ kg de CO}_{2\text{eq}} / \text{año}}$$

Por cada pasteurización, con la caldera aislada y utilizando GLP como fuente de energía, se emiten 17,96 kg de CO_{2eq}. Si se anualizan estas emisiones y se sabe que la pasteurización se realiza una vez por semana, la cantidad de CO_{2eq} emitida al año es de 933,91kg.

Este valor, al multiplicarse por el 23% que representa reemplazar la calefacción con la caldera aislada por biogás, resulta en una disminución de emisión de 214,80 kg CO_{2eq}/año. Por tanto, el proceso de pasteurización con caldera aislada y utilizando el 23% de biogás como fuente de energía tendría una emisión de 719, 01 kg de CO_{2eq}/año.

Es importante señalar que este cálculo no incluye el CO_{2eq} evitado por el tratamiento adecuado de un residuo que podría ser desechado de manera inadecuada, como en un vertedero o en otro entorno, liberando una gran cantidad de metano (CH₄), que tiene un potencial de calentamiento de la atmósfera 21 veces superior al producido por el CO₂.

5.2 PROPUESTAS DE MEJORA AL BIODIGESTOR

Como ya fue mencionado, el biodigestor de la granja del penal se desea operar a una temperatura de 25°C, y se pretende que esté enterrado en el suelo, donde las temperaturas medias del suelo de la zona son constantes y rondan los 16°C¹⁰. Para lograr mantener la temperatura de operación del biodigestor constante (25°C), primero se debe evaluar el biodigestor en sus condiciones actuales. Luego, a partir de este análisis, se pueden proponer alternativas de aislamiento y calefacción que permitan mantener la temperatura de operación constante, considerando la eficiencia y el costo económico.

Al igual que para el análisis térmico de la caldera, resulta apropiado aplicar el software SIMUSOL para analizar el comportamiento térmico y de transferencia térmicas del biodigestor al medio circundante. Previo a realizar la simulación, en el programa se debe armar un modelo esquemático similar al ya mencionado, con las respectivas tablas y procesos de transferencia de calor involucrados del biodigestor, sin aislamiento y con aislamiento (Anexo VIII y Anexo IX).

¹⁰ <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/ladyot/catalogo/cdandes/cap06.htm>

5.2.1 COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL BIODIGESTOR SIN AISLAMIENTO

El comportamiento térmico del biodigestor a lo largo de un día, se determina mediante la variación °C/día que posee el digestato en su interior, si se lo operaba a una temperatura de 25°C con una temperatura de suelo constante de 16°C, convección forzada en el techo del biodigestor y bajo condiciones climatológicas de invierno y verano. Para conocer el comportamiento térmico bajo ambas condiciones climatológicas, se realizó una simulación para cada una (Anexo X - Anexo XIV).

Evaluar la variación térmica del biodigestor a lo largo del tiempo resulta sumamente importante, ya que, como se mencionó en la FAO (2011), la temperatura de operación del biodigestor no debe fluctuar más allá de un rango de 0,6 a 1,2 °C/día. Esto se debe a que una variación térmica superior a estos valores puede afectar el microbiota interna y detener el proceso de biodigestión.

La simulación del biodigestor sin aislar permite estimar que tendría una fluctuación térmica de -2°C/hora, lo cual está muy por encima del rango sugerido. Incluso, se puede observar en la simulación que la pérdida térmica es tal que, en poco más de 5 horas, la temperatura interna del biodigestor iguala la temperatura del suelo si éste comienza operando a 25°C con una temperatura de suelo de 16°C (Anexo X - Anexo XIV).

La situación se observa tanto en condiciones climáticas de invierno como de verano; por lo que el comportamiento térmico interno es independiente de la condición climática de la granja del penal. Además, con este comportamiento, se observa que la variación térmica está muy influenciada por las pérdidas por conducción que posee el biodigestor con el suelo, y no por las pérdidas por convección y radiación que tenga la parte superior del digestor con el aire exterior (Anexo X - Anexo XIV).

5.2.2 COMPORTAMIENTO DEL BIODIGESTOR CON DIFERENTES ESPESORES DE EPS

Al igual que el biodigestor sin aislamiento, el biodigestor con cualquier espesor comercial de EPS simulado, presenta un comportamiento térmico independiente de las condiciones climáticas de la granja del Penal. Esto significa que la variación térmica se continúa observando, influenciada por las pérdidas térmicas por conducción del biodigestor aislado con el suelo, y no por las pérdidas por convección y radiación que tenga la parte superior del digestor aislado con el aire exterior (Anexo X - Anexo XIV).

Tabla N° 20: Variación Térmica (°C/día) del sustrato del biodigestor según diferentes espesores de aislamiento de Telgopor. Fuente de elaboración propia.

AISLAMIENTO	VARIACIÓN TÉRMICA
S/AISLAMIENTO	-2 °C/hora
2 cm de EPS	-1,493 °C/día
5 cm de EPS	-0,643 °C/día
10 cm de EPS	-0,334 °C/día
15 cm de EPS	-0,207 °C/día
20 cm de EPS	-0,159 °C/día
25 cm de EPS	-0,140 °C/día

Al observar la tabla N°20, se puede concluir que el biodigestor aislado con un espesor de 2 cm de EPS tendrá un comportamiento térmico de $-1,493\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{día}$, por lo que no garantiza que la variación térmica del biodigestor sea menor al rango de fluctuación térmica recomendado por FAO,2011. El espesor de 5 cm como aislante generaría una variación térmica de $-0,643\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{día}$, cumpliendo parcialmente con el rango sugerido. Los espesores de EPS de 10 cm, 15 cm, 20 cm y 25 cm presentan los valores de variación térmica de $-0,334\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{día}$; $-0,207\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{día}$; $-0,159\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{día}$ y $-0,140\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{día}$; por lo que resultarían apropiados para aislar el biodigestor, ya que cumplen con generar una variación térmica dentro del rango requerido.

5.2.3 INVERSIÓN Y TIPOS DE CALEFACCIÓN DEL BIODIGESTOR SIN AISLAMIENTO Y CON AISLAMIENTO

Aplicar un aislamiento de EPS, independientemente del espesor, requiere saber previamente que el tamaño de aislante de EPS comercial viene en planchas de 1 m^2 para todo tipo espesor. Como la superficie del biodigestor a aislar es de 12 m^2 , serán necesarias 12 planchas del tamaño comercial mencionado para aislarlo. La tabla N°21 muestra a continuación el costo por unidad de EPS ($1\text{ m}^2\text{ c/u}$) y el costo total de necesitar 12 placas para cada espesor.



Figura N° 35:Placas de EPS (Poliestireno) de 1 m^2 . Fuente: Easy Cencosud¹¹, 2023.

Tabla N° 21:Costo de aislamiento del biodigestor para cada espesor de EPS. Fuente de elaboración propia (31de marzo del 2023).

¹¹ https://www.easy.com.ar/plancha-pe-20mm-20kgm3/p?idsku=1325116&gclid=Cj0KCQIAj4ecBhD3ARIsAM4Q_jGxeBgcQwjRqkjt_jzDlpFk3ha3w1-RxbIEsgoQPzrSM6SRH7L3WrEaAnlLEALw_wcB&gclid=aw.ds

ESPESOR EPS	COSTO UNIDAD (\$/unidad)	UNIDADES	COSTO TOTAL (\$)	COSTO TOTAL (US\$) ¹²
2 cm	740,00	12	8.880,00	41,30
5 cm	1.082,33	12	12.987,96	60,41
10 cm	1.969,54	12	23.634,48	109,92
15 cm	3.051,87	12	36.622,44	170,34
20 cm	3.939,08	12	47.268,96	219,86
25 cm	5.021,41	12	60.256,92	280,26

Al observar la tabla anterior, se puede ver cómo el costo aumenta a medida que aumenta el espesor del aislante. Los valores de costo total varían desde 8.800 pesos (41,30 dólares) para un biodigestor completamente aislado con un espesor de 2 cm hasta los 60.256,92 pesos (280 dólares) para un biodigestor aislado con un espesor de 25 cm.

Además del análisis de costo de aislamiento, se procede a utilizar la información suministrada por la tabla N°20 para simular con cada espesor de aislamiento (EPS) el aporte energético necesario para mantener la temperatura del sustrato en 25°C y con una variación térmica del sustrato por debajo del rango requerido por FAO, (2011) (-0,6 °C/día). Esta simulación permitirá conocer el número de veces que se debe calefaccionar el biodigestor por semana, así como la energía total necesaria para compensar en el periodo. La tabla N°22 se debe armar con los a partir de los gráficos del anexo XII-XIV.

Tabla N° 22: Potencia (kW) simulada, horas de calefacción(h) simulada, Energía (kWh) calculada, N° de calefacciones simuladas por semana, Energía semanal (kWh) calculada. Fuente de elaboración propia.

AISLAMIENTO	POTENCIA (kW)	HORAS (H) DE CALEFACCIÓN	ENERGÍA EN (kWh)	N° DE DÍAS CALEFACCIÓN /SEMANA	ENERGÍA SEMANAL (kWh/SEMANA)
S/Aislamiento	11,51	24	276,24	7	1.933,68
2 cm de EPS	2,25	3	6,75	3	20,25
5 cm de EPS	2,25	3	6,75	2	13,5
10 cm de EPS	1,75	3	5,25	1	5,25
15 cm de EPS	1,25	3	3,75	1	3,75
20 cm de EPS	1	3	3	1	3
25 cm de EPS	1	3	3	1	3

Si se observa la tabla anterior, se puede apreciar que, sin aislamiento, el biodigestor requiere un aporte energético de 1.933,68 kWh por semana. Para 2 cm de espesor de EPS se necesita 20,25 kWh semanal; para 5 cm de espesor de EPS, se requiere 13,5 kWh por semana; para 10 cm, se debe aportar 5,25 kWh por semana; para 15 cm, se hará necesario el aporte de 3,75 kWh por semana; y para 20 y 25 cm, solamente se requerirá un aporte energético de 3 kWh por semana.

El aporte de energía al biodigestor puede realizarse mediante resistencia eléctrica o la implementación de un sistema de calefacción solar que incluya un termotanque solar y un

¹² https://www.bcra.gov.ar/MediosPago/Tipos_de_Cambio_SML.asp

acumulador. Para optar por la mejor opción para implementar en el biodigestor del penal, es necesario realizar un análisis y comparación de los costos de cada sistema.

Si se opta por la implementación de una resistencia eléctrica para calentar el biodigestor, se debe estimar el costo anual de energía eléctrica que se requiere. Para ello, se utiliza el Cuadro Tarifario de EDEMSA¹³ vigente hasta el 30 de abril del año 2023, según el cual, el costo de la energía eléctrica para una demanda de Tipo “General (G) - T1 G” es de 25,6928 \$/kWh.

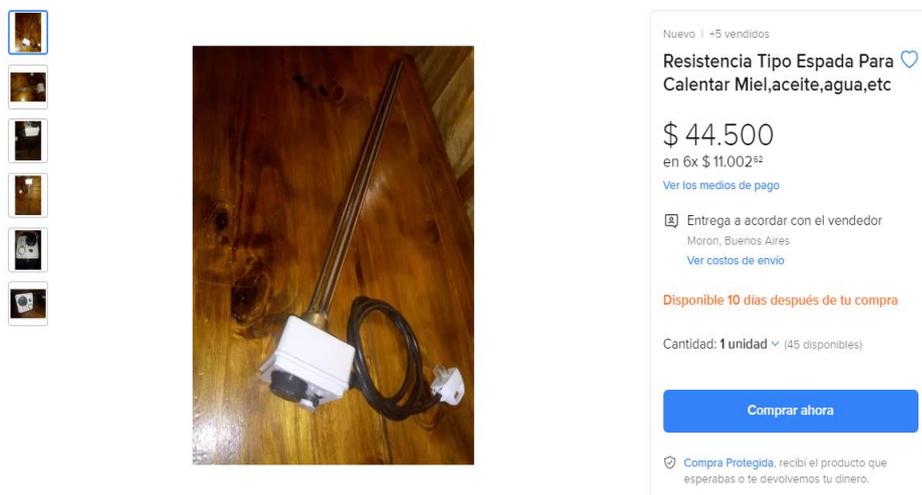


Figura N° 36: Resistencia eléctrica de 85 cm de largo con termostato. Fuente Mercado Libre, marzo 2023.

Con base a la tabla N°22, donde se determinó la demanda de energía semanal (kWh/semana) para los diferentes espesores de EPS utilizados en el biodigestor, se conforma la tabla N°23, que muestra el costo semanal y anual de calefacción del biodigestor para los diferentes espesores. La columna de “Costo total semanal” se obtiene como resultado de multiplicar el costo de la energía eléctrica (25,6928 \$/kWh) por la demanda de energía semanal, que posterior a eso se anualiza en las 52 semanas que tiene un año para conformarse la columna “Costo Total Anual” para cada espesor.

Tabla N° 23: Costo Semanal (\$) y Costo Total Anual. Fuente de elaboración propia (31 de marzo del 2023).

AISLAMIENTO	COSTO TOTAL SEMANAL (\$)	COSTO TOTAL ANUAL (\$)	COSTO TOTAL ANUAL (US\$) ¹⁴
S/Aislamiento	49.681,65	2.583.445,98	12.016,02
2 cm de Telgopor	520,28	27.054,52	125,83
5 cm de Telgopor	346,85	18.036,34	83,89
10 cm de Telgopor	134,89	7.014,13	32,63
15 cm de Telgopor	96,348	5.010,10	23,30
20 cm de Telgopor	77,08	4.008,08	18,64
25 cm de Telgopor	77,08	4.008,08	18,64

La Tabla N° 23 muestra que sin aislamiento el costo total anual de aporte energético por resistencia eléctrica asciende a unos \$ 2.583.445,98 (12.016,02 dólares) que resulta

¹³ <https://www.edemsa.com/wp-content/uploads/2023/03/CT-Los-Andes-publica-2-03-2023.pdf>.

¹⁴ https://www.bcra.gob.ar/MediosPago/Tipos_de_Cambio_SML.asp

muy elevado para el mantenimiento del biodigestor. Por otro lado, el aislamiento con EPS genera reducciones significativas en el costo de calefacción para el Penal de Gustavo André, variando desde los 27.054,52 pesos anuales (125,83 dólares) para un aislamiento de 2 cm de espesor de EPS hasta solo 4.008,08 pesos anuales (18,64 dólares) con un aislamiento de 20 cm o 25 cm de espesor.

Tabla N° 24: Inversión Total (US\$) de cada tipo de aislamiento con resistencia eléctrica como método de calefacción para el biodigestor del Penal. Fuente de elaboración propia (marzo del 2023).

AISLAMIENTO	INVERSIÓN AISLAMIENTO BIODIGESTOR (\$)	INVERSIÓN RESISTENCIA ELÉCTRICA (\$)	INVERSIÓN AISLAMIENTO CALDERA (\$)	INVERSION TOTAL (\$)	INVERSION TOTAL (US\$) ¹⁵
2 cm de EPS	8.880,00	44.500,00	4.777,54	58.157,54	270,50
5 cm de EPS	12.987,96	44.500,00	4.777,54	62.265,50	289,61
10 cm de EPS	23.634,48	44.500,00	4.777,54	72.912,02	339,13
15 cm de EPS	36.622,44	44.500,00	4.777,54	85.899,98	339,53
20 cm de EPS	47.268,96	44.500,00	4.777,54	96.546,50	449,05
25 cm de EPS	60.256,92	44.500,00	4.777,54	109.534,46	509,46

La Tabla N° 24 muestra que la inversión total necesaria para cada espesor de aislamiento con la instalación de una resistencia eléctrica; que también, incluye la inversión de \$ 4.777 que se debe hacer para aislar la caldera. Se observa que los valores oscilan entre 58.077,54 pesos (270,50 dólares) para un espesor de 2 cm y 109.534,46 pesos (509,46 dólares) para un espesor de 25 cm.

Si se propone como alternativa una calefacción del biodigestor con energía renovable, la radiación solar directa de la zona es de aproximadamente 1350 W/m² en hora de mediodía. Por lo tanto, se podría considerar utilizar un colector solar de la figura N°37, el cual almacena hasta 200 litros de agua. El costo de este colector solar es de \$210.000 pesos (976,74 dólares) argentino a marzo del 2023.

¹⁵ https://www.bcra.gov.ar/MediosPago/Tipos_de_Cambio_SML.asp

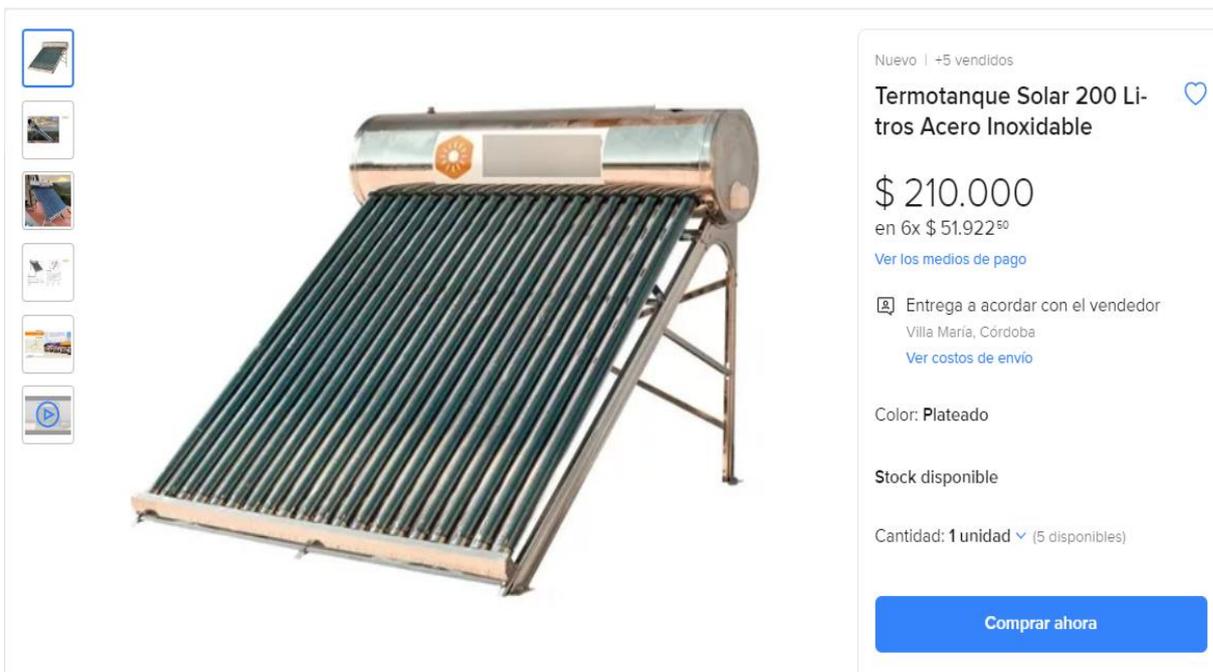


Figura N° 37: Termotanque Solar 200 litros de Acero Inoxidable. Fuente de Mercado Libre, marzo de 2023.

Tabla N° 25: Inversión Total (\$) para cada espesor aislante con la instalación de un colector solar como mecanismo de calefacción del biodigestor e incorporación de aislamiento en la caldera. Fuente de elaboración propia.

AISLAMIENTO	INVERSIÓN EN AISLAMIENTO (\$)	TERMOTANQUE SOLAR (\$)	INVERSIÓN AISLAMIENTO CALDERA (\$)	INVERSIÓN TOTAL (\$)	INVERSIÓN TOTAL (US\$)
2 cm de EPS	8.880,00	210.000,00	4.777,54	223.577,54	1039,89
5 cm de EPS	12.987,96	210.000,00	4.777,54	227.765,50	1059,37
10 cm de EPS	23.634,48	210.000,00	4.777,54	238.412,02	1108,89
15 cm de EPS	36.622,44	210.000,00	4.777,54	251.399,98	11693,0
20 cm de EPS	47.268,96	210.000,00	4.777,54	262.046,50	1218,82
25 cm de EPS	60.256,92	210.000,00	4.777,54	275.034,46	1279,23

Como se muestra en la Tabla N°25, los valores de inversión con un colector solar como método de calefacción van desde casos van desde los 223.577,54 pesos (1039,89 dólares) para un espesor de EPS de 2 cm hasta los 275.034,46 pesos (1279,23 dólares) para un espesor de EPS de 25 cm. Vale aclarar, que este análisis no incluye el costo de instalación de una bomba de recirculación ni el costo de energía asociado al uso de la esta.

5.2.4 ANALISIS DE COSTOS DE CADA TIPO DE INVERSIÓN

El Valor Actual Neto (VAN) viene dado por el flujo de caja de un proyecto o alternativa de inversión. Se utiliza para calcular el valor presente neto de una inversión, es decir, el valor actual de los flujos de efectivo futuros. Se define al VAN como la diferencia

entre el valor actual de los ingresos y el valor actual de los egresos: **(VAN = VAI – VAE)** (Tulián y Mónaco,1999).

No obstante, en este caso solo se debe calcular el VAE (Valor Actual de los Egresos), ya que el objetivo es solamente analizar cuál resulta ser la propuesta de inversión en aislamiento y calefacción del biodigestor que represente el mínimo costo a futuro. La fórmula empleada para el cálculo del VAE en cada propuesta es la siguiente.

Ecuación N° 11: Ecuación de VAE (Valor Actual de Egresos). Fuente: Tulián y Mónaco, 1999.

$$\text{VAE (n)} = I_0 + C_{(n-1)} * [(1 - 1+i^{-n})]$$

Donde

- VAE (n): Valor Actual del Egreso para el año (n).
- I₀: Inversión Inicial.
- C: Costo de egreso anual el primer año (n = 1).
- i: Tasa de Interés anual.
- n: Periodo (año).

Los valores de inversión Inicial (I₀) para las propuestas de aislamiento y calefacción deben ser tomados de la columna “Inversión Total” de las Tabla N°24 y N°25. Estas propuestas deben ser analizadas tomando un periodo de tiempo (n) de 3, 5 y 10 años. Además, se considera una tasa de mercado del 75% anual, según el Banco Central de la República Argentina (BCRA)¹⁶, para el mes de marzo del 2023.

El costo de egreso anual (C) para el aislamiento y calefacción con resistencia eléctrica viene dado costo total anual de energía de la tabla N°26. En cambio, si el biodigestor se aísla y se calefacciona utilizando un termotanque solar no se tendrá un costo de egreso anual (C) ya que no se incurrirá en gastos de electricidad para la calefacción.

Tabla N° 26: Valor Actual de los Egresos (VAE) para los periodos de 3, 5 y 10 años correspondientes a los diferentes espesores de aislamiento calefaccionados con resistencia eléctrica. Fuente de elaboración Propia.

AISLAMIENTO	VAE (3 años)	VAE (5 años)	VAE (10 años)
2 cm de EPS	87.419,47	91.952,43	94.016,33
5 cm de EPS	81.826,78	84.848,75	86.224,68
10 cm de EPS	80.519,18	81.694,39	82.229,48
15 cm de EPS	91.333,67	92.173,11	92.555,32
20 cm de EPS	100.893,46	101.565,01	101.870,77
25 cm de EPS	113.881,42	114.552,97	114.858,73

Tabla N° 27: Valor Actual de los Egresos (VAE) para los periodos de 3, 5 y 10 años correspondientes a los diferentes espesores de aislamiento calefaccionados con resistencia eléctrica. Fuente de elaboración Propia.

¹⁶ https://www.bcra.gob.ar/BCRAyVos/Plazos_fijos_online.asp

AISLAMIENTO	VAE (3 años)	VAE (5 años)	VAE (10 años)
2 cm de EPS	223.577,54	223.577,54	223.577,54
5 cm de EPS	227.765,50	227.765,50	227.765,50
10 cm de EPS	238.412,02	238.412,02	238.412,02
15 cm de EPS	251.399,98	251.399,98	251.399,98
20 cm de EPS	262.046,50	262.046,50	262.046,50
25 cm de EPS	275.034,46	275.034,46	275.034,46

Si se observan las tablas N°26 y N°27, se puede ver que la propuesta que representa el mínimo costo a corto y largo plazo es el aislamiento de 10 cm de espesor de EPS con calefacción por resistencia eléctrica. Además, independientemente del espesor de aislamiento, se observa que la calefacción por resistencia eléctrica es a corto y largo plazo más económica que la instalación de un colector solar.

La tabla N°27 muestra valores actuales de egresos (VAE) iguales para cada tipo de espesor con el tiempo. Esto se debe al supuesto de que no se incurre en un costo anual de energía, debido a la utilización de la energía solar como aporte energético para el biodigestor. No obstante, se debe recordar que la propuesta de calefacción solar es realizada sin tener en cuenta la inversión en una bomba de recirculación de agua y sin considerar el costo de energía anual asociado al uso de dicha bomba. Por lo que sería adecuado considerar un costo anual asociado las propuestas de aislamiento con calefacción solar.

5.3 CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

DISPONIBILIDAD DE BIOMASA Y PRODUCCION DE BIOGÁS

- Las cabras y ovejas de la granja del penal producen 400 kg de estiércol por día, lo que equivale a 146.000 kg al año. Esta cantidad de estiércol posee un potencial energético de 1639,29 MJ/día o un equivalente de 597.247,35 MJ/año por biodigestión anaeróbica.
- De los 400 kg de excreta diarios, solo se pueden aprovechar 7,8 kg (2%) para el proceso de biodigestión en el penal. Estos 7,8 kg de estiércol deben mezclarse con agua en una relación estiércol-agua de aproximadamente 1:6 para garantizar un contenido de Sólidos Totales (ST) menor al 8%.
- El biodigestor de la granja del penal operado a 25 °C y por las dimensiones que posee, se estima que sería capaz de producir 0,429 Nm³ de biogás al día. En términos energéticos, se estima que ofrecería 9,27 MJ/día.

DEMANDA ENERGETICA DE LA CALDERA (CON Y SIN AISLAMIENTO)

- La demanda energética total de la caldera sin aislar es de 70.714 kcal/pasteurización, que en biogás equivale a unos 13,58 Nm³ biogás / pasteurización. Al aplicar aislamiento

con lana de vidrio de 2,5 cm de espesor, las pérdidas disminuyen en 2.687 kcal, por lo que la demanda total de la caldera con aislante se estima en 68.027,27 kcal/pasteurización.

- Sin el aislamiento de la caldera, se requieren 6,43 kg de GLP para cada proceso de pasteurización. Sin embargo, si se implementa el aislamiento de la caldera, se logra un ahorro de 0,25 kg de GLP por pasteurización, reduciendo así el consumo a 6,18 kg de GLP por proceso. Desde una perspectiva económica, este ahorro por pasteurización equivale a 66,75 pesos. Al considerar las 52 pasteurizaciones realizadas anualmente, esto representa un ahorro total de 3.471 pesos al año (equivalente a 16,14 dólares). El costo total del aislamiento es de 4.777 pesos (22,22 dólares). Si dividimos el ahorro anual entre el costo del aislamiento, obtenemos un período de recuperación simple de la inversión (TRI) de 1,4 años.
- La demanda energética total de la caldera aislada (68.027,27 kcal/pasteurización) que expresados en términos de biogás equivale a 13,05 Nm³ por pasteurización. No obstante, el biogás que se produzca en el penal para solo sería capaz de cubrir un 23% de esa demanda requerida por pasteurización.
- La caldera con aislamiento y el aporte de ese 23% de biogás en la calefacción, permitiría ahorrar un adicional de 1,42 Kg de GLP en cada pasteurización. En términos económicos se va a ahorrar 379,14 pesos por cada pasteurización (1,76 dólares), anualizada en las 52 pasteurizaciones por año, se obtendría un ahorro anual de 19.715,28 pesos (91,69 dólares).
- Si se considera el ahorro anual de 3.471 pesos (1,76 dólares) que se obtiene de solo aislar la caldera con lana de vidrio de 2,5 cm de espesor, y se suma a los 19.715,28 pesos (91,69 dólares) que se ahorran al reemplazar el 23% de la demanda de energía de la caldera aislada con biogás, se obtiene un ahorro total de 23.186,28 pesos anuales (107,84 dólares).

DISMINUCIÓN DE LOS GEI

- Por cada pasteurización, con la caldera sin aislar y utilizando GLP como fuente de energía, se emiten 18,67 kg de CO₂eq. Si se anualizan estas emisiones y se sabe que la pasteurización se realiza una vez por semana, la cantidad de CO₂eq emitida al año es de 970,84 kg.
- Por cada pasteurización, con la caldera aislada y utilizando GLP como fuente de energía, se emiten 17,96 kg de CO₂eq. Si se anualizan estas emisiones y se sabe que la pasteurización se realiza una vez por semana, la cantidad de CO₂eq emitida al año es de 933,91 kg de CO₂eq/año.
- Si la pasteurización se realiza con una caldera aislada y un 23% de la demanda energética es cubierto por biogás, se produciría una disminución de emisión de 214,80 kg CO₂eq/año, reduciendo la emisión total anual a 719,01 kg de CO₂eq/año.

COMPORTAMIENTO TERMICO DEL BIODIGESTOR CON Y SIN AISLAMIENTO

- El biodigestor sin aislamiento tendría un comportamiento térmico de $-2^{\circ}\text{C}/\text{hora}$, muy por encima del rango ($0,6 - 1,2^{\circ}\text{C}/\text{día}$) sugerido por FAO, 2011. En poco más de 5 horas, la temperatura interna del biodigestor igual a la temperatura del suelo si éste comienza operando a 25°C con una temperatura de suelo de 16°C . Este comportamiento resulta independiente de las condiciones climáticas de la granja del penal.
- El comportamiento térmico del biodigestor aislado con un espesor de 2 cm de EPS será de alrededor de $-1,49^{\circ}\text{C}/\text{día}$, por lo que no garantiza que la variación térmica del biodigestor sea menor al rango de fluctuación térmica recomendado por FAO,2011. El espesor de 5 cm como aislante generaría una variación térmica de $-0,643^{\circ}\text{C}/\text{día}$, cumpliendo parcialmente con el rango sugerido. Los espesores de EPS de 10 cm, 15 cm, 20 cm y 25 cm presentan los valores de variación térmica de $-0,334^{\circ}\text{C}/\text{día}$; $-0,207^{\circ}\text{C}/\text{día}$; $-0,159^{\circ}\text{C}/\text{día}$ y $-0,140^{\circ}\text{C}/\text{día}$; por lo que resultarían apropiados para aislar el biodigestor, ya que cumplen con generar una variación térmica dentro del rango requerido.
- Al igual que sin aislamiento, el biodigestor con cualquier espesor comercial de EPS presenta un comportamiento térmico independiente de las condiciones climáticas de la granja del Penal.

INVERSIÓN EN AISLAMIENTO Y CALEFACCIÓN

- El mantenimiento del biodigestor sin aislamiento tendría un costo total anual de calefacción por resistencia eléctrica que asciende a los 2.583.445,98 pesos (12.016,02 dólares); costo que resulta inviable económicamente para el Penal de Gustavo André. Por otro lado, el aislamiento con EPS genera reducciones significativas en el costo de calefacción por dicho método para el Penal de Gustavo André, variando desde los 27.054,52 pesos anuales (125,83 dólares) para un aislamiento de 2 cm de espesor de EPS hasta solo 4.008,08 pesos anuales (18,64 dólares) con un aislamiento de 20 cm o 25 cm de espesor.
- Si se toma la inversión total necesaria para cada espesor de aislamiento del biodigestor, sumado la instalación de una resistencia eléctrica para calefacción y la inclusión de inversión de 4.777 pesos para aislar la caldera. Se observa valores totales de inversión de 58.157,54 pesos (270,50 dólares), si se aísla el biodigestor con 2 cm de EPS, hasta unos 109.534,46 pesos (509,46 dólares) si el aislamiento de biodigestor es con 25 cm de EPS.
- Si se adopta como calefacción la utilización de un colector solar; los valores de inversión entre aislamiento del biodigestor, adquisición del colector solar y la inclusión de inversión de 4.777 pesos para aislar la caldera tendría costo que iría desde los 223.577,54 pesos (1039,89 dólares), si el aislamiento del biodigestor es con un espesor de EPS de 2 cm, hasta los 275.034,46 pesos (1279,23 dólares), si el aislamiento del biodigestor se realiza con EPS de 25 cm. Vale aclarar, que este análisis no incluye el costo de instalación de una bomba de recirculación ni el costo de energía asociado al uso de la misma.

- La propuesta de aislamiento y calefacción que representa el menor costo a corto, mediano y largo plazo es el aislamiento de 10 cm de espesor de EPS con calefacción por resistencia eléctrica del biodigestor. Además, independientemente del espesor de aislamiento, se observa que la calefacción por resistencia eléctrica es a largo del tiempo menos costosa económicamente que la instalación de un colector solar; para el cual no se tuvo en cuenta en cuenta la inversión en una bomba de recirculación del fluido y el costo de energía anual que implica su uso.
- Ambas propuestas de calefacción y aislamiento resultan ser viables económicamente para las instalaciones del penal de Gustavo André; siempre y cuando se encuentren los medios para financiarlas y amortizadas rápidamente. Uno de estos medios podría ser los flujos de Ingresos provenientes de la venta de hongos Girgolas.
- El estudio económico de la aislación y calefacción del biodigestor no ha contemplado el balance entre sus costos y beneficios, ya que no se consideró un potencial flujo de ingresos por la comercialización y venta de los hongos. No obstante, desde la formación profesional y por lo analizado en el presente trabajo se sugiere realizar la implementación de un aislamiento de 10 cm de espesor con calefacción por resistencia eléctrica para el biodigestor como la propuesta más óptima y viable en el corto, medio y largo plazo.
- Se deberá considerar en los cálculos el aporte energético necesario para calentar el sustrato que se incorporé al biodigestor (variable dependiendo las condiciones térmicas del lugar)

BIBLIOGRAFÍA

- Ajay, C. (2021). *Decentralized energy from portable biogas digesters using domestic kitchen waste: A review*. Manipal Institute of Technology, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering. India: Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.031>
- ANAPE (Asociación Nacional de Poliestireno Expandido). (2003). Libro Blanco del EPS (Documento de Antecedentes para la Normalización del EPS). Madrid, España: EUMEPS. Recuperado el 02 de 2023, de https://www.serina.es/empresas/anape_construccion/pdf/Libroblanco.pdf
- Andrade Gallegos, R. H., & Mata, G. &. (2012). LA PRODUCCIÓN IBEROAMERICANA DE HONGOS COMESTIBLES EN EL CONTEXTO INTERNACIONAL. En J. E. Sánchez, *Hongos comestibles y medicinales en Iberoamerica (Investigación y desarrollo en un entorno)* (Primera Edición ed., pág. 398). Tapachula , Chiapas , Mexico : ECOSUR Y INECOL. Obtenido de <https://biblioteca.ecosur.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=000037257>
- Barba Bellettini, M., Assumpcao Fiorda, F., Aparecida Maieves, H., Lopes Teixeira, G., Ávila, S., Silveira Hornung, P., . . . Hoffmann Ribani, R. (2015). *Factors affecting mushroom Pleurotus spp.* Federal University of Parana´, Department of Chemical Engineering & Department of Agronomy. Curitiba, Parana State; Brazil: Elsevier. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.12.005>
- Barrena Gurbillón, M. Á., Maicelo Quintana, J. L., Gamarra Torres, O. A., Oliva Cruz, S. M., Leiva Espinoza, S. T., Taramona Ruíz, L. A., . . . Ordinola Ramírez, C. M. (2019). *Biogás: Producción y Aplicaciones* (Primera Edición ed., Vol. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM)). (U. N. (UNTRM), Ed.) Chachapoyas, Amazonas , Perú: Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM). doi:<https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/1841>
- Bernal Patiño, L. E. (2018). *Diseño conceptual de un biodigestor a partir de estiércol vacuno y avícola, producido en la finca El Guarumal, para la obtención de biogás*. Fundación Universidad de América, Facultad de Ingenierías. Bogotá - Colombia : Fundación Universidad de América. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.11839/6844>
- Briseño Arciniega, L. A. (2017). *Producción de biogás a través de la codigestión de residuos sólidos y semisólidos: hacia una planta centralizada de biogás para la generación de energía*. Centro de Investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica, S.C. (cideteq), Querétaro - Mexico . doi:<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/114955/Memoria%20de%20T%20c3%a9ctu%20Carlos%20Rodr%20c3%a9guez%20final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cabrera, A. L. (1976). *Regiones Fitogeográficas Argentinas. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería. Tomo 2. Fascículo 1*. Buenos Aires, Argentina: Acme. Obtenido de <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=BIBUNTU.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=000048>
- Carhuacho León, F. M. (2012). *Aprovechamiento del estiércol de gallina para la elaboración de biol en biodigestores tipo Batch como propuesta al manejo de Residuo Avícola*. Facultad de Ciencias - Universidad Nacional Agraria La Molina , Departamento Académico Ingeniería Ambiental. Física y Metrología . Lima - Perú: Biblioteca Agrícola Nacional . doi:<https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/1769>
- Catalan Marin, P. O. (2017). *EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL CENTRO DE ACOPIO DE NOPAL Y VERDURA Y DEL BIODIGESTOR ASOCIADO*. Tesina de grado , Universidad Nacional Autónoma de México , México .

- Çengel, Y. A. (2011). *Trasferencia de calor y masa* (4 ed.). Nevada & Oklahoma, Nevada & Oklahoma, United States of America(USA): McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V. Obtenido de https://www.academia.edu/12140362/Transferencia_de_Calor_y_Masa_4ta_ed_Yunus_Cengel
- Chanakya, H., & Malayil, S. &. (2013). *Cultivation of Pleurotus spp. on a combination of anaerobically digested plant material and various agro-residues*. Indian Institute of Science, Centre for Sustainable Technologies (CST). Bangalore, India: Elsevier. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2015.04.007>
- Costáble, C. A. (2019). *Pretratamiento térmico y enzimático como alternativas de mejora del proceso de hidrólisis de producción de biogás, aplicado a Scenedesmus sp. y Chlorella sp., microalgas autóctonas de la provincia de Mendoza*. Tesis de grado , Universidad Nacional de Cuyo , Facultad de Ciencias Agrarias , Mendoza.
- Delgado, A. M. (2019). *Curso Transferencia de calor - Ingeniería Mecánica*. Obtenido de Curso Transferencia de calor - Ingeniería Mecánica: https://www.youtube.com/watch?v=Cz1j-PWbK4&list=PLvZRNG90yabCMgp3Gj4eHZ_I_apcnWwZy&index=6
- Departamento de Hidrología - Departamento General de Irrigación (DGI). (2022). *Serie Climatológica de la Estación Gustavo André y Estación Tres Porteñas período 1998 - 2028*. Mendoza .
- Fabara Peralvo, T. A. (2020). *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN REACTOR ANAEROBIO CON SISTEMA DE CALENTAMIENTO BASADO EN ENERGÍAS ALTERNATIVAS PROYECTADO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS*. Universidad Politécnica Salesiana . Quito- Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana Ecuador. doi:<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19360/1/UPS%20-%20TTS195.pdf>
- FAO ; Ministerio de Energía Gobierno de Chile;Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) & Global Environment Facility. (2011). *Manual de Biogás* . (P. C. Renovables", Ed.) Santiago, Chile: FAO . doi:<https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- FAO;. (2019). *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores*. Buenos Aires , Argentina : FAO . doi:http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/GuiadeBiogasyBiodigestores-19-08-29.pdf
- Garzón Gómez, J. P. (2008). *Producción de Pleurotus Ostreatus sobre residuos sólidos lignocelulósicos de diferentes procedencia*. Universidad de Colombia , Facultad de Agronomía, Colombia . doi:<http://dx.doi.org/10.22490/24629448.403>
- Gavilánez, A., Caiza, G., Tapia, M., & Mora, J. (2020). Energías Renovables y Diseño Industrial: Influencia en Sudamérica. *Ingenio*, 3(2), 55-67. doi:<https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/INGENIO/issue/view/217/268>
- Goicoa, V. (2016). *Relevamiento nacional de plantas de biogás*. Relevamiento , NTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial) & INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria), San Luis, Argentina . Obtenido de https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_-33-relevamiento_nacional_de_plantas_de_biogas_-_goicoas_v.pdf
- González Matute, R. &. (2008). *El cultivo de hongos de especialidad es un negocio lucrativo*. Universidad Nacional del Sur (UNS) & Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas(CONICET). Argentina : Agro UNS. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11336/19980>
- Guisasola, A. A. (2022). *Evaluación de la biodigestión aplicada al tratamiento de residuos sólidos provenientes de la industria de cerveza artesanal en Mendoza, Argentina*. Tesis de grado, Universidad Nacional de Cuyo , Facultad de Ciencias Agrarias , Mendoza - Argentina . Recuperado el 2022, de https://bdigital.uncuyo.edu.ar/objetos_digitales/18039/guisasola-crembil-agustin-tesis.pdf
- Hilbert, J. A. (2003). *Manual para la producción de Biogas*. Castelar, Buenos Aires, Argentina: INTA Castelar. doi:<https://inta.gob.ar/documentos/manual-para-la-produccion-de-biogas>

- Huaytalla Galindo, B. J. (2019). *IDENTIFICAR EL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASARESIDUAL AGRÍCOLA PARA SU APROVECHAMIENTO COMO USO DOMESTICO*. Universiada Científica del Sur , Facultad de Ciencias Ambientales, Lima- Perú. doi:<https://doi.org/10.21142/tb.2020.1261>
- Ibarra Islas, A. (2019). *Aprovechamiento de residuos agroforestales en el cultivo de hongos Basidiomicetos*. Universidad Abierta y a Distancia de Mexico , Division de Ciencias de la Salud, Biológicas y Ambientales . Mexico : UnADM (Universidad Abierta y a Distancia de Mexico). Obtenido de http://www.repositorio.unadmexico.mx:8080/jspui/bitstream/123456789/192/1/PT2_2091-1_ES1511123754.pdf
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2007). *Guía técnica para el diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) - Ministerio de Industria, Turismo y Comercio . Madrid, España : La Asociación Técnica Española de Climatización Refrigeración (ATECYR). doi:978-84-96680-08-1
- Incropera, F. P. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor* (4 ed.). Mexico , Mexico : Prentice Hall, HISPANOAMERICANA. S.A. . Recuperado el 2022
- Instituto de Investigación en Energías no Convencionales (INENCO) - CONICET Universidad de Salta. (2016). *Programa SIMUSOL TUTORIAL Termodinamica, Mecánica, Electricidad*. Salta - Argentina . Obtenido de <https://www.SIMUSOL.org/downloads/SIMUSOL-tutorial-2016.pdf>
- J.N., M., Barea, G., & Manrique, S. &. (2018). *Modelado de comportamiento termico de un biodigestor, calefaccionado con energia solar, mediante el software SIMUSOL*. Instituto de Ambiente Hábitat y Energía (INAHE), Centro Científico Tecnológico Mendoza (CCT - Mendoza); Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Mendoza,Argentina : Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Obtenido de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/108240/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Jaramillo Mejía, S. &. (2014). *Estandarizacion y desarrollo de tecnologias de bajo costo para la produccion de hongos comestibles del genero Pleurotus (Basidiomycota)*. Instituto de Investigaciones Biotecnologicas , Instituto Tecnologico de Chascomús; CONICET & Universidad Nacional de San Martín, Laboratorio de micologia y cultivos de hongos comestibles. Chascomús, Buenos Aires - Argentina: CONICET. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11336/79201>
- Kostic, M., Brkic, M., & Jovanovic, M. (2018). *Thermal insulation materials: Principles, properties and applications*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Larco Dávalos, J. &. (2014). *Diseño y construcción de un equipo didáctico de convección forzada con sistema de control centralizado para el Laboratorio de Transferencia de Calor*. Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional , Facultad de Ingeniería Mecánica , Quito . Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7489/1/CD-5607.pdf>
- Levenspiel, O. (1998). *Engineering Flow and Heat Exchange (Third Edition)* (Third Edition ed.2014). Corvallis, Oregon , United State of America : Springer. doi:10.1007/978-1-4899-7454-9
- López, I., & Arriaga, A. &. (2017). *La dimensión social del concepto de desarrollo sostenible: ¿La eterna olvidada?* Universidad de Zaragoza & Universidad Carlos III de Madrid, Facultad de Ciencias Sociales y del Trabajo & Facultad de Ciencias Sociales y Jurídicas. Madrid & Zaragoza - España : Federación Española de Sociología. doi: <http://dx.doi.org/10.22325/fes/res.2018.2>
- Lorenzo Acosta, Y. &. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *Revista*, XXXIX(1), 35-48. doi:<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>

- Mahmudul, H., Rasul, M., Akbar, D., & Narayanan, R. (2020). *A comprehensive review of the recent development and challenges of a solar-assisted biodigester system*. Central Queensland University; University of Technology Sydney & Prince Mohammad Bin Fahd University, School of Engineering and Technology; Clean Energy Academy; School of Business and Law, Central Queensland University & Mechanical Engineering Department. Australia & Saudi Arabia : Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141920>
- Makamure, F. &. (2020). *An analysis of biodigester substrate heating methods: A review*. University of Fort Hare, Alice campus, Department of Physics. South Africa: Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110432>
- Manrique, S. M. (2015). *Biomasa con fines energeticos: Recursos, Potencialidades y Cambio Climatico*. (Primera edicion ed.). Ciudad de Buenos Aires , Buenos Aires , Argentina: EduTecNe (Universidad Tecnologica Nacional). Recuperado el 11 de 2021
- Martí Herrero, J. (2019). *Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación*. Ecuador : RedBiolac. doi:<https://www.beegroup-cimne.com/biodigestores-tubulares-guia-de-diseno-y-manual-de-instalacion/>
- Martinez, I. (1992). *Termodinámica: Básica y Aplicada* (1 ed.). Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid . Obtenido de <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c12/Conveccion%20termica%20y%20masica.pdf>
- Marrama, S. E. (2021). *La ley N° 27.640/2021 de biocombustibles y la sustentabilidad ambiental agroproductiva y energética*. Universidad Católica Argentina. Buenos Aires: Erreius. Obtenido de <https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/12462>
- Mata, G., & Salmones, D. &. (2017). LAS ENZIMAS LIGNOCELULOLÍTICAS DE *Pleurotus* spp. En J. E. Sánchez, *La biología, el cultivo y las propiedades nutricionales y medicinales de las setas Pleurotus spp.* (Primera edicion ed., pág. 353). Tapachula, Chiapas, Mexico : ECOSUR . Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/321686533_La_Biologia_el_cultivo_y_las_propiedad es_nutricionales_y_medicinales_de_las_setas_Pleurotus_spp](https://www.researchgate.net/publication/321686533_La_Biologia_el_cultivo_y_las_propiedad_es_nutricionales_y_medicinales_de_las_setas_Pleurotus_spp)
- Mazeh Dehaini, H. (2022). *Planta de Biogás: Constrcción y producción a partir de los desechos de animales y cultivos por digestión anaeróbica*. Trabajo de Fin de Grado de Ingeniería Mecánica, Universidad Politecnica de Valencia , Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño , Valencia. Obtenido de <https://riUNET.upv.es/bitstream/handle/10251/184107/Mazeh%20-%20Planta%20de%20Biogas%20Construccion%20y%20produccion%20a%20partir%20de%20desechos%20de%20animales%20y%20cultivos%20po....pdf?sequence=1>
- Mejía, Á. D. (1 de 12 de 2022). @aldeme75. Obtenido de [https://www.youtube.com/@aldeme75:](https://www.youtube.com/@aldeme75) https://www.youtube.com/watch?v=Cz1j_PWbK4&t=166s & <https://www.youtube.com/watch?v=lbFyC8fsogA&t=872s>
- Mendéz, J. C. (3 de 08 de 2021). Escuela N° 6-038 Ingeniero Cesar Chipolletti; Aula Satélite Unidad N°4 Colonia y Granja Penal . (F. Sanchez, & E. Alejandro, Entrevistadores) Gustavo André, Lavalle , Mendoza, Argentina .
- Millan, G. (19 de 06 de 2022). Subdirector del Aula Satelite, Unidad N°4 Colonia y Granja Penal de Gustavo André, departamento de Lavalle Mendoza. (E. A. Sanchez, Entrevistador)
- Moreno, L., & Andrade, R. &. (2017). LA PROTECCIÓN DEL SUSTRATO PARA EL CULTIVO DE *Pleurotus* spp. Y OTROS HONGOS COMESTIBLES. En J. E. Sanchez, *La biología, el cultivo y las propiedades nutricionales y medicinales de las Setas Pleurotus spp.* (Primera edicion ed., pág. 353). Tapachula, Chiapas , Mexico : ECOSUR. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/321686533_La_Biologia_el_cultivo_y_las_propiedad es_nutricionales_y_medicinales_de_las_setas_Pleurotus_spp](https://www.researchgate.net/publication/321686533_La_Biologia_el_cultivo_y_las_propiedad_es_nutricionales_y_medicinales_de_las_setas_Pleurotus_spp)

- Muslimin, R. y. (2021). *The effect of different substrates on oyster mushroom (Pleurotus ostreatus) spawn growth*. State Polytechnic of Fakfak & Faculty of Mathematics and Natural Science, Universitas Negeri, Department of Agroindustry & Department of Biology. Indonesia : The Electromechanical society. Obtenido de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/911/1/012044/pdf>
- Pérez - Chávez, A. M., Mayer, L., & Albertó, E. (2019). *Mushroom cultivation and biogas production: A sustainable reuse of organic resources*. Universidad Nacional de San Martín (UNSAM)-Consejo Nacional de Investigaciones (CONICET), Laboratory of Mycology and Mushroom Cultivation. Instituto Tecnológico de Chascomús (IIB-INTECH). Chascomús; Buenos Aires; Argentina: Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.03.002>
- PINCHEIRA GARCÉS, P. A. (2014). *Mercado de hongos exóticos; elaboración de un plan de negocio para el cultivo de Pleurotus Ostreatus; "Hongo Ostra"*. Trabajo de titulación para optar al título de Ingeniero Civil-Industrial, Universidad Austral de Chile, Escuela de Ingeniería Civil Industrial, Puerto Montt, Chile. Obtenido de <https://docplayer.es/58675165-Mercado-de-hongos-exoticos-elaboracion-de-un-plan-de-negocio-para-el-cultivo-de-pleurotus-ostreatus-hongo-ostra.html>
- Piña Guzmán, A. B., & Nieto Monteros, D. A. (2015). *UTILIZACIÓN DE RESIDUOS AGRÍCOLAS Y AGROINDUSTRIALES EN EL CULTIVO Y PRODUCCIÓN DEL HONGO COMESTIBLE SETA (Pleurotus spp.)*. Instituto Politecnico Nacional; Universidad técnica particular de Loja & REDISA. Red de Ingeniería en Saneamiento Ambiental., Sección de Posgrado e Investigación, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología; Sección de Ingeniería Ambiental, Departamento de Química y Ciencias Exactas. Mexico & Ecuador : Revista Internacional de Contaminación Ambiental. doi: <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.05.10>
- Quispe Vargas, R. (2021). *PRODUCCION DEL HONGO COMESTIBLE (Pleurotus ostreatus) UTILIZANDO DIFERENTES TIPOS DE SUSTRATOS EN EL CENTRO AGRONÓMICO K'AYRA – SAN JERÓNIMO – CUSCO*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO, ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA-FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS, Cusco, Perú. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12918/6246>
- Reynoso, M. A. (2017). *Biodigestión Anaeróbica: una alternativa para el tratamiento de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos*. Tesis de grado, Facultad de Ciencias Agrarias - Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza - Argentina. Recuperado el 2023
- Rodriguez Venady, C. A. (2012). *PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DEL BAGAZO CERVECERO*. Tesina de grado, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronomicas, Santiago Chile. doi:<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/114955/Memoria%20de%20T%20c3%adtu%20Carlos%20Rodr%20c3%adguez%20final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Salomones, D. &. (2017). RECURSOS GENÉTICOS DEL GÉNERO Pleurotus. En J. E. Sanchez, *La biología, el cultivo y las propiedades nutricionales y medicinales de las setas Pleurotus spp.* (Primera edición ed., pág. 353). Tapachula, Chiapas, Mexico : ECOSUR. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/321686533_La_Biologia_el_cultivo_y_las_propiedades_nutricionales_y_medicinales_de_las_setas_Pleurotus_spp
- Sanchez, J. E. (2017). PRODUCCIÓN MUNDIAL DE SETAS Pleurotus spp. CON ENFASIS EN PAISES LATINOAMERICANOS. En J. E. Sanchez, *La biología, el cultivo y las propiedades nutricionales y medicinales de las setas* (Primera edición ed., pág. 353). Tapachula, Chiapas, Mexico : ECOSUR. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/321686533_La_Biologia_el_cultivo_y_las_propiedades_nutricionales_y_medicinales_de_las_setas_Pleurotus_spp
- Schallenberg Rodríguez, J. C., Piernavieja Izquierdo, G., Hernández Rodríguez, C., Unamunzaga Falcón, P., García Déniz, R., Díaz Torres, M., . . . Martel Rodríguez, G. &. (2008). *Energías Renovables y eficiencia energetica*. Canarias, España : Instituto Tecnológico de Canarias

S.A. . doi:<https://www.cienciacanaria.es/files/Libro-de-energias-renovables-y-eficiencia-energetica.pdf>

- Shen, Q. (2017). PRODUCCIÓN COMERCIAL DE LA SETA *Pleurotus* spp. En J. E. Sanchez, *La biología, el cultivo y las propiedades nutricionales y medicinales de la setas Pleurotus spp.* (Primera edición ed., pág. 353). Tapachula , Chiapas , Mexico : ECOSUR . Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/321686533_La_Biologia_el_cultivo_y_las_propiedades_nutricionales_y_medicinales_de_las_setas_Pleurotus_spp
- Sierra Salas, F. &. (2014). *SISTEMA DE CULTIVO PARA LA GESTIÓN DE HONGOS COMESTIBLES COMO COMPLEMENTO ALIMENTICIO DIRIGIDO A LOS HABITANTES DE LA COMUNA 18 DE CALI PARA MEJORAR LA SEGURIDAD ALIMENTARIA CAUSADA POR LA INACCESIBILIDAD.* Universidad Icesi, Facultad de Ingeniería . Santiago de Cali, Colombia : ACADEMIA (Accelerating the world's research). Obtenido de https://www.academia.edu/36454161/SISTEMA_DE_CULTIVO_PARA_LA_GESTI%C3%93N_DE_HONGOS_COMESTIBLES_COMO_COMPLEMENTO_ALIMENTICIO_DIRIGIDO_A_LOS_HABITANTES_DE_LA_COMUNA_18_DE_CALI_PARA_MEJORAR_LA_SEGURIDAD_ALIMENTARIA_CAUSADA_POR_LA_INACCESIBILIDAD?bulkDownload
- Singh, M., Kamal, S., & Parkash, S. &. (2021). Status and trends in world mushroom production-III - World Production of Different Mushroom Species in 21st Century. *Mushroom Society of India, ICAR-DMR, Solan.* Obtenido de <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=IN2022016137>
- Solano Galvis, O. J. (2018). *Estudio del potencial de la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia de estiércol.* Universidad Santo Tomás, Facultad de Química Ambiental. Bogotá-Colombia: Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-Biblioteca. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/13169/2018oscarsolano.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Suárez Arango, C. (2010). *OBTENCIÓN IN VITRO DE MICELIO DE HONGOS COMESTIBLES, SHIITAKE (*Lentinula edodes*) Y ORELLANAS (*Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus pulmonarius*) A PARTIR DE AISLAMIENTOS DE CUERPOS FRUCTÍFEROS, PARA LA PRODUCCIÓN DE SEMILLA.* Universidad Nacional de Colombia , Facultad de Ciencias . Bogotá, Colombia : UNAL (Universidad Nacional de Colombia). Recuperado el 2022, de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/70516>
- Thibault, P. (2010). *Mejoramiento del comportamiento térmico de un biodigestor low-cost tipo plug-flow.* Proyecto, Institut de Tècniques Energètiques (INTE) de la Universidad Politècnica de Catalunya (UPC) & Grupo de Apoyo al Sector Rural (GRUPO) de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP)., Perú. Obtenido de <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Thibault-Perrigault-84940624>
- Tulián, C. E. & Monaco, M.L. (1999). *Rentas Ciertas* (Segunda Edición ed.). Mendoza, Mendoza, Argentina: Facultad de Ciencias Economicas - Universidad Nacional Cuyo.
- Vega, D., Freire, M., Torres, T., & Llumiquinga, K. &. (2022). *Biodigestión: proceso autosostenible para la obtención de energía renovable.* Facultad de Ciencias Agropecuarias y del Ambiente., Departamento de Biotecnología, Carrera de Ingeniería Agroindustrial. Guaranda, Ecuador : Red Universitaria Internacional de Ingeniería Agroindustrial. doi: <http://dx.doi.org/10.17268/JAIS.2022.004>

ANEXO

ANEXO I: CÁLCULO COEFICIENTE CONVECTIVO “H” CALDERA SIN AISLANTE

Previo a realizar la simulación con SIMUSOL, es necesario calcular los coeficientes convectivos de los materiales. Esto se consigue mediante el uso de la metodología planteada por Incropera y col. (1999) en el capítulo 7 y (Mejía, 2022), tanto para la convección natural como para la convección forzada. El cálculo del coeficiente convectivo requiere conocer previamente el Número de Nusselt (Ne). Una vez calculados, los datos obtenidos deben ser introducidos en el programa para que éste calcule las pérdidas térmicas del sistema que se está evaluando.

Ecuación N° 12: Ecuación de Coeficiente Convectivo "Hcov".

$$H_{cov} = Ne * K / L$$

Donde:

- K: Conductividad térmica del Fluido (agua o aire) W/m²
- L: Longitud de la superficie (Rectangular, Cilíndrica o esférica)
- Ne: Número de Nusselt

Para determinar el coeficiente de convección del agua en estado de ebullición de la caldera, se considera un coeficiente de convección (Hcov) de 10.000 W/m² °C, de acuerdo con Incropera y col. (1999). No obstante, para calcular el coeficiente de convección de la pared externa de acero de la caldera, se asumen algunos supuestos como: un flujo laminar y estacionario de aire dentro del invernadero, una condición de 10°C o 283°K (Méndez, 2022) dentro del invernadero en los periodos más fríos del año, y una temperatura exterior de la capa de acero próxima a los 96°C.

Entonces se tiene:

- Temperatura exterior Acero (Temp acero) = 96°C - 367 K
- Temperatura Invernadero (peor condición) = 10°C - 283 K

A partir de las temperaturas de superficie y ambiente, se calcula la Temperatura de Película (Tf). Esto se debe a que las propiedades del fluido varían con la temperatura a lo largo de la capa límite y esto influye en la transferencia de calor.

Ecuación N° 13: Temperatura de la capa límite (Tf).

$$Tf = \frac{1}{2} * [Temp. Acero + Temp. Invernadero]$$

- $Tf = \frac{1}{2} * (96^\circ - 10^\circ) = 53^\circ C$

La temperatura de Película o Capa Límite (Tf) es de 53°C. Esta información se utiliza para determinar las propiedades físicas del aire a una presión de 1 atmósfera (atm), que se encuentran tabuladas en Çengel (2011). Utilizando la tabla de Çengel (2011), para una Tf de 53°C, las propiedades termofísicas del aire corresponden al aire:

- K conductividad del aire (W/m * °C) = **0,02735**
- Viscosidad cinemática (Vc) (m²/s) = **1,80*10⁻⁰⁵**
- Número de Prandtl, Pr = **0,7228**

La convección que ocurre en el interior del invernadero es una "Convección Natural o Libre", por lo que el cálculo del número de Nusselt (NE) está en función del Número de Rayleigt (Ra). Dicho número de Rayleigt está en función del Número de Grashof (Gr) y del Número de Prandtl (Pr). Éste último es un parámetro adimensional que relaciona las fuerzas de flotación y las fuerzas viscosas en flujo. Viene dado por la siguiente fórmula:

Ecuación N° 14: Número de Grashof(GR).

$$GR = g * B * (T. \text{ exterior acero} - T \text{ aire}) * L^3 / (Vc)^2$$

Donde:

- g: es la aceleración de la gravedad, en m/s²
- B: es el coeficiente de expansión térmica volumétrica, T⁽⁻¹⁾.
- L: Longitud o altura del cilindro, en m
- Vc: Viscosidad cinemática del flujo, en m/s²
- T Ext acero: Es la temperatura superficial de la chapa de acero, en K.
- T aire: Es la temperatura del aire, en K.

- g = 9,80
- β El coeficiente de expansión volumétrica (T⁽⁻¹⁾) se calcula: β = (1/(Tf+273))
- β = (1/ (53+273)) = 0,0031
- L = 1
- Viscosidad Cinemática = 1,80 * 10⁻⁵
- T. Exterior del acero K= 367
- T. Aire Invernadero K = 283

Resolviendo

$$GR \text{ (Numero de Grashof)} = 9,80 * 0,031 * (367 - 283) * 1^3 / (1,80 * 10^{-5}) = \mathbf{8 * 10^9}$$

Luego de que se calcula el número de Raleigh (Ra) es un parámetro adimensional que se interpreta de la misma manera que el número de Grashof (GR)

Ecuación N° 15: Número de Raleigh (Ra).

$$Ra = (g * B * (T. \text{ exterior acero} - T. \text{ aire}) * L^3 / (VC)^2$$

Resolviendo

$$Ra = 9,80 * 0,031 * (367 - 283) * 1^3 / (1,80 * 10^{-5}) * 0,7228 = \mathbf{5,60 * 10^9}$$

Para determinar si la caldera se puede considerar como un elemento de placa plana, se utiliza el número de Grashof. Esta fórmula, $D > 0 = 35L / (GR^{1/4})$, establece que, si el diámetro de la caldera es mayor que la expresión, se puede considerar como un elemento de placa plana para los cálculos.

La expresión (35L/(GR^{1/4})) está formada por:

- L: Longitud o altura del cilindro (m) = 1
- GR: Numero de Grashof = $8 \cdot 10^9$

La expresión queda resuelta de la siguiente manera:

$$35 \cdot 1 / (8 \cdot 10^9)^{1/4} = 1,17 \cdot 10^{-1} = \mathbf{0,117 \text{ m}}$$

Dado que el diámetro de la caldera es de 0,404 m, lo que supera los 0,117 m de la expresión anterior, se considera que la caldera tiene geometría plana para los cálculos. Con el conocimiento de que el número de Raleigh (Ra) es de $5,60 \cdot 10^9$, se busca la fórmula de Nusselt adecuada para este caso, que resulta ser el rango de valores entre 10^4 y 10^9 (Çengel, 2011).

Ecuación N° 16: Número de Nusselt (Nu) para Número de Raleigh (Ra) entre 10^4 y 10^9

$$\mathbf{Nu = 0,59 \cdot Ra^{(1/4)}}$$

$$- \text{Nu} = 0,59 \cdot (5,60 \cdot 10^9)^{(1/4)} = \mathbf{162,67}$$

A partir, del Numero de Nusselt se resuelve la ecuación N°12 del coeficiente convectivo "H".

$$- \text{H cov} = (0,02735 \text{ W/m} \cdot \text{°C} / 1 \text{ m}) \cdot 162,67 = \mathbf{4,45 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

El coeficiente convectivo de la pared externa de acero de la caldera al aire resulta ser de $4,45 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$.

ANEXO II: CÁLCULO COEFICIENTE CONVECTIVO (H) CALDERA CON AISLAMIENTO

Considerando que la caldera no está aislada, se sugiere colocar lana de vidrio como aislante para disminuir las pérdidas de transferencia de calor de la caldera hacia el invernadero. Esta opción es apropiada porque la lana de vidrio tiene una baja conductividad térmica ($k= 0,030 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) y es capaz de resistir temperaturas entre 250°C y 400°C (Kostic y col., 2018). El espesor óptimo de lana de vidrio para colocar en la caldera se evalúa de acuerdo al costo y a la disminución efectiva en las pérdidas de calor que ésta ofrece.

Para determinar las pérdidas por transferencia de calor mediante el software SIMUSOL, es necesario calcular el coeficiente convectivo (H_{cov}) de la lana de vidrio, colocada en la caldera como aislante, hacia el invernadero. Para realizar este cálculo, se llevó a cabo el mismo procedimiento que para la caldera sin aislar. Al momento de calcular el coeficiente de convección de la superficie exterior de la lana de vidrio al invernadero, se hicieron los mismos supuestos que en los cálculos sin aislante. Estos incluyen un flujo laminar del movimiento de aire en el interior del invernadero donde se encuentra la caldera, y una condición térmica de 10°C en el interior del mismo al momento de la operación de la caldera.

Determinar la temperatura de la superficie exterior de la lana de vidrio en un recinto con una temperatura de 10°C , se planteó un modelo de transferencia de calor utilizando las conductividades y espesores del acero y la lana de vidrio. Se utilizó un coeficiente convectivo del agua hirviendo (H_{cov}) de $10.000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, una temperatura de agua en ebullición de 96°C y una temperatura del aire interior de 10°C .

Si se busca calcular el coeficiente de convección entre la capa externa de la lana sin ninguna protección hacia el aire, es necesario conocer la temperatura de la capa límite (T_f) de la lana de vidrio. Por lo tanto, se simuló el modelo con un espesor de aislante de 25 mm (2,5 cm), el cual es el mínimo disponible en el mercado, utilizando el coeficiente convectivo de superficie de la caldera sin aislar $H = 4,45 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

De este modo, al utilizar el coeficiente de convección de la caldera sin aislar y con la peor condición térmica propuesta, se determinó que la temperatura de la superficie exterior de la lana de vidrio, bajo esas condiciones del invernadero, sería de $22,4^\circ\text{C}$. Luego, se calculó el coeficiente convectivo real de la caldera aislada mediante el mismo procedimiento empleado para el cálculo del coeficiente convectivo de la caldera sin aislar, para determinar la transferencia de calor entre la superficie exterior de la lana de vidrio y el aire del invernadero.

Entonces para calcular el coeficiente convectivo (H_{cov}) de la lana de vidrio a utilizar para una caldera aislada se aplica lo siguiente:

Temperatura exterior Lana de Vidrio (Temp Lana de Vidrio) = $22,4^\circ\text{C} - 288,4\text{K}$.

Temperatura del aire en el Invernadero (peor condición) = $10^\circ\text{C} - 283\text{K}$.

A partir de ambas temperaturas se procede a calcular la Temperatura en la capa Límite o Temperatura de película (T_f). (Ecuación N° 13)

$$- T_f = \frac{1}{2} * (22,4^\circ\text{C} + 10^\circ\text{C}) = \mathbf{16,2^\circ\text{C}}$$

Es decir, la temperatura de película o capa límite (T_f) es de 16,2 °C. A partir de este dato y utilizando la tabla de Çengel, 2011, corresponden las siguientes propiedades termofísicas para una T_f de 15 °C:

- K conductividad del aire ($W/m \cdot ^\circ C$) = 0,02476
- Viscosidad cinemática (V_c) (m^2/s) = $1,470 \cdot 10^{-5}$
- Número de Prandtl, $Pr = 0,7323$

A partir de estos datos se procede al cálculo del número de Grashof (Ecuación N°14).

- $g = 9,80$
- $\beta = (1 / (16,2+273)) = 0,0035$
- Viscosidad Cinemática = $1,470 \cdot 10^{-5}$
- T Exterior del acero $K = 295,4$
- T Aire Invernadero $K = 283$
- GR (Numero de Grashof) = $9,80 \cdot 0,0035 \cdot (295,4-283) \cdot 1^3 / (1,470 \cdot 10^{-5})^2$
- **GR = $1,95 \cdot 10^9$**

A partir de calcular Grashof, se calcula el número de Raleigh (Ra) (Ecuación N°15).

- $Ra = GR \cdot Pr$
- **Ra = $1,95 \cdot 10^9 \cdot 0,7323 = 1,43 \cdot 10^9$**

Posterior a esto, se verifica previamente el Número de Nusselt (Ne) para determinar si la caldera con aislamiento de lana de vidrio (geometría cilíndrica) puede ser considerada como una superficie de placa plana. Para ello, se debe evaluar la misma expresión que se utiliza para la caldera sin aislamiento: $D \geq 35 \cdot L / (GR^{1/4})$. Se tiene que:

- L: Longitud o altura de la caldera = 1 m
- GR: Numero de Grashof = $1,95 \cdot 10^9$

La expresión queda resuelta de la siguiente manera:

- $35 \cdot 1 / (1,95 \cdot 10^9)^{1/4} = 1,66 \cdot 10^{-1} = \mathbf{0,166}$

Como el diámetro de la caldera es de 0,404 m y, por lo tanto, mayor que 0,166 de la expresión; la caldera aislada con lana de vidrio para los cálculos debe ser considerada como de geometría plana. A partir de esto y conociendo que el Número de Raleigh (RA) es $1,43 \cdot 10^9$, se procede a utilizar la Ecuación N°16 para el cálculo de Nusselt adecuado para este caso, obteniendo un rango de valores entre 10^4 y 10^9 (Çengel, 2011).

- $Nu = 0,59 \cdot (1,43 \cdot 10^9)^{(1/4)} = \mathbf{114,76}$

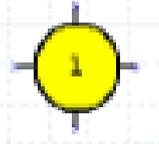
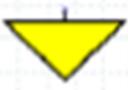
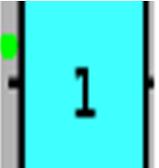
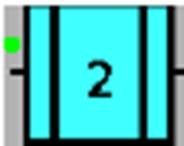
A partir de tener el Número de Nusselt (Nu), se calcula el coeficiente convectivo H de la superficie de la lana de Vidrio.

- $H_{cov} = (0,02476 W/m \cdot ^\circ C / 1 m) \cdot 114,76 = \mathbf{H_{cov} = 2,75 W / m^2 \cdot ^\circ C.}$

El coeficiente convectivo (H_{cov}) de la superficie exterior de la lana de virio hacia el aire del invernadero será de $2,75 W / m^2 \cdot ^\circ C$

ANEXO III: ELEMENTOS DEL PROGRAMA SIMUSOL

Tabla N° 28: Elementos utilizados para graficar modelos térmicos y simular con el software "SIMUSOL". Fuente de elaboración propia basado en (INENCO – CONICET, 2016).

ELEMENTOS	DESCRIPCION	REPRESENTACIÓN
<p><u>Nodo de Temperatura</u></p> 	<p>Se coloca por cada temperatura que se introduzca en el modelo del sistema.</p>	
<p><u>Cero Grado Celsius (°C)</u></p> 	<p>El cero grado Celsius es una temperatura de referencia que se la representa con un símbolo especial constituido por un triángulo amarillo.</p>	
<p><u>Resistencias Convectivas</u></p> 	<p>Se utiliza un rectángulo de color celeste para representar el intercambio de calor que existe entre un cuerpo y un fluido. Unidades ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).</p> <p>Existen dos opciones: Aquellas en las que las entradas y salidas son horizontales y la otra en que las mismas son verticales.</p> <p>Este flujo se identifica con una R seguido por el nombre elegido y está formado por no más de 4 símbolos alfa numéricos.</p>	<p>R (nombre) = V1, A, h</p> <p>V1: "V" Nos especifica que es una resistencia de tipo convectivo y el "1" nos dice que se refiere a una superficie de intercambio plana.</p> <p>A: Superficie de intercambio (m^2)</p> <p>h: Coeficiente convectivo (Calculado previamente u obtenido por tabla) ($W/m \cdot ^\circ C$)</p>
<p><u>Resistencias Conductivas</u></p> 	<p>Se lo representa con rectángulo celeste con líneas dobles en los lados por los que entra y sale un flujo. Unidades ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).</p> <p>Se utiliza cuando un cuerpo sólido se coloca en contacto con dos superficies a temperatura T1 y T2.</p>	<p>R (nombre) = D1, A, e, k</p> <p>D1: D Nos especifica que es un cuerpo conductivo plano y el 1 nos dice que se refiere a un intercambio en una superficie plana.</p> <p>A: Área de intercambio (m^2).</p> <p>e: Espesor del material</p>

	<p>Este elemento recibe el nombre de resistencia conductiva.</p> <p>Al igual que en él, caso anterior, el nombre identificatorio tendrá no más de cuatro símbolos y al dar los datos necesarios se antepondrá una R al mismo por ser una resistencia.</p>	<p>conductivo. (m)</p> <p>k: Coeficiente conductivo (Calculado previamente u obtenido por tabla) (W/m*°C)</p>
<p><u>Resistencias Radiativas</u></p> 	<p>Todo cuerpo a una temperatura dada emite radiación electromagnética. Unidades (W/m²*°C)</p> <p>Esta radiación se representa con el símbolo que se halla a la derecha, y que al igual que en los casos anteriores se le asignará un nombre</p>	<p>R(Nombre) = R1, A, ε, f</p> <p>D1: Nos especifica que es un cuerpo conductivo plano y el 1 nos dice que se refiere a un intercambio en una superficie plana.</p> <p>A: Área de la superficie plana de Intercambio (m²)</p> <p>ε: Emisividad de la superficie de intercambio</p> <p>f: factor de forma que depende de la posición relativa de las superficies paralelas.</p>
<p><u>Masas Térmicas</u></p> 	<p>Todos los cuerpos que intervienen en la definición de fenómeno térmico.</p> <p>La masa térmica será identificada con un nombre se agregará una C antepuesta al resto del nombre.</p>	<p>C = C1, cp, M</p> <p>C1: Indica que es una masa cp: calor específico (J/kg*°C) m: masa térmica (kg)</p>
<p><u>Flujo de Calor</u></p> 	<p>En el SIMUSOL los flujos de calor están referidos a un área A. Esto se ha organizado así porque en las simulaciones es solares es muy común el flujo de energía solar en un área dada. Si el flujo no está referido a un área, el valor A se lo indica como 1</p>	<p>J = JQ, A, q</p> <p>A: Es el área de referencia (m²). q: El flujo de calor por unidad de área (W/m²)</p>

**Fuentes de
Temperatura**



Durante una simulación es muchas veces necesario introducir una temperatura como dato, ya sea constante o variable en el tiempo.

E = (°C) Temperatura constante

E = Tabla (tiempo)

ANEXO IV: MODELOS DE TRANFERENCIAS DE CALOR DE LA CALDERA

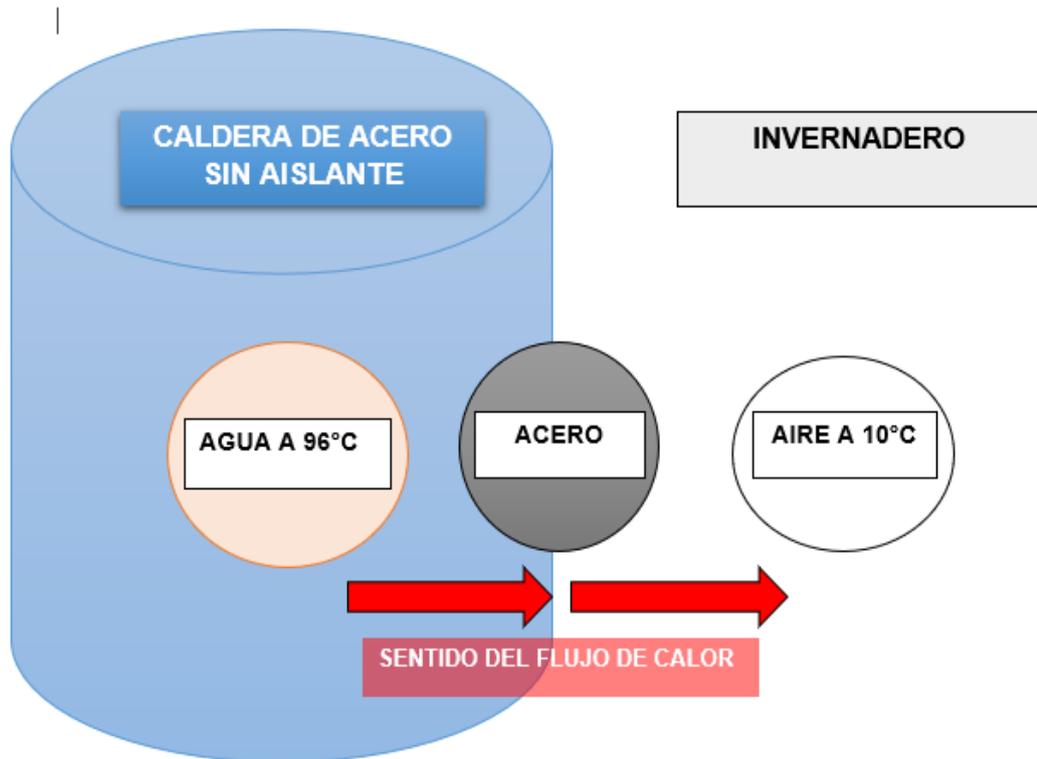


Figura N° 38: Modelo esquemático sencillo con los principales nodos de transferencia de calor utilizados en la simulación con SIMUSOL para la caldera sin aislamiento. Fuente de elaboración propia, 2023.

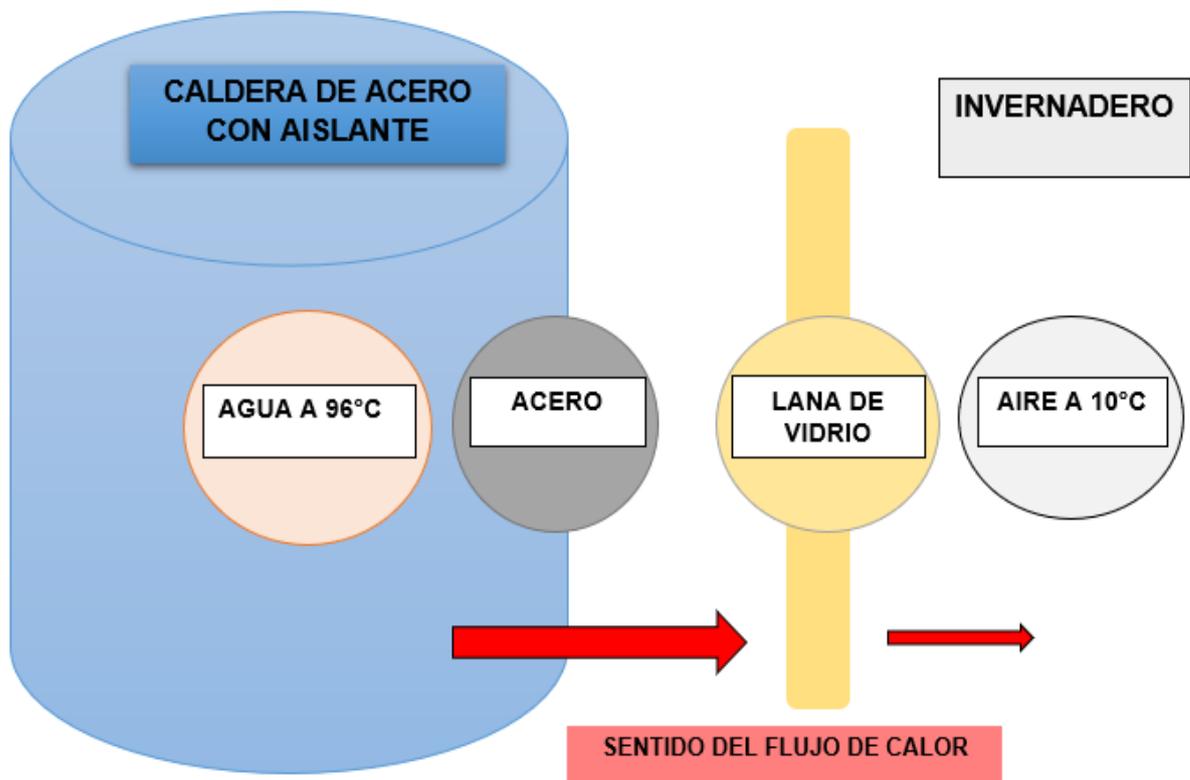


Figura N° 39: Modelo esquemático sencillo con los principales nodos de transferencia de calor utilizados en la simulación con SIMUSOL para la caldera aislada con lana de vidrio. Fuente de elaboración propia, 2023.

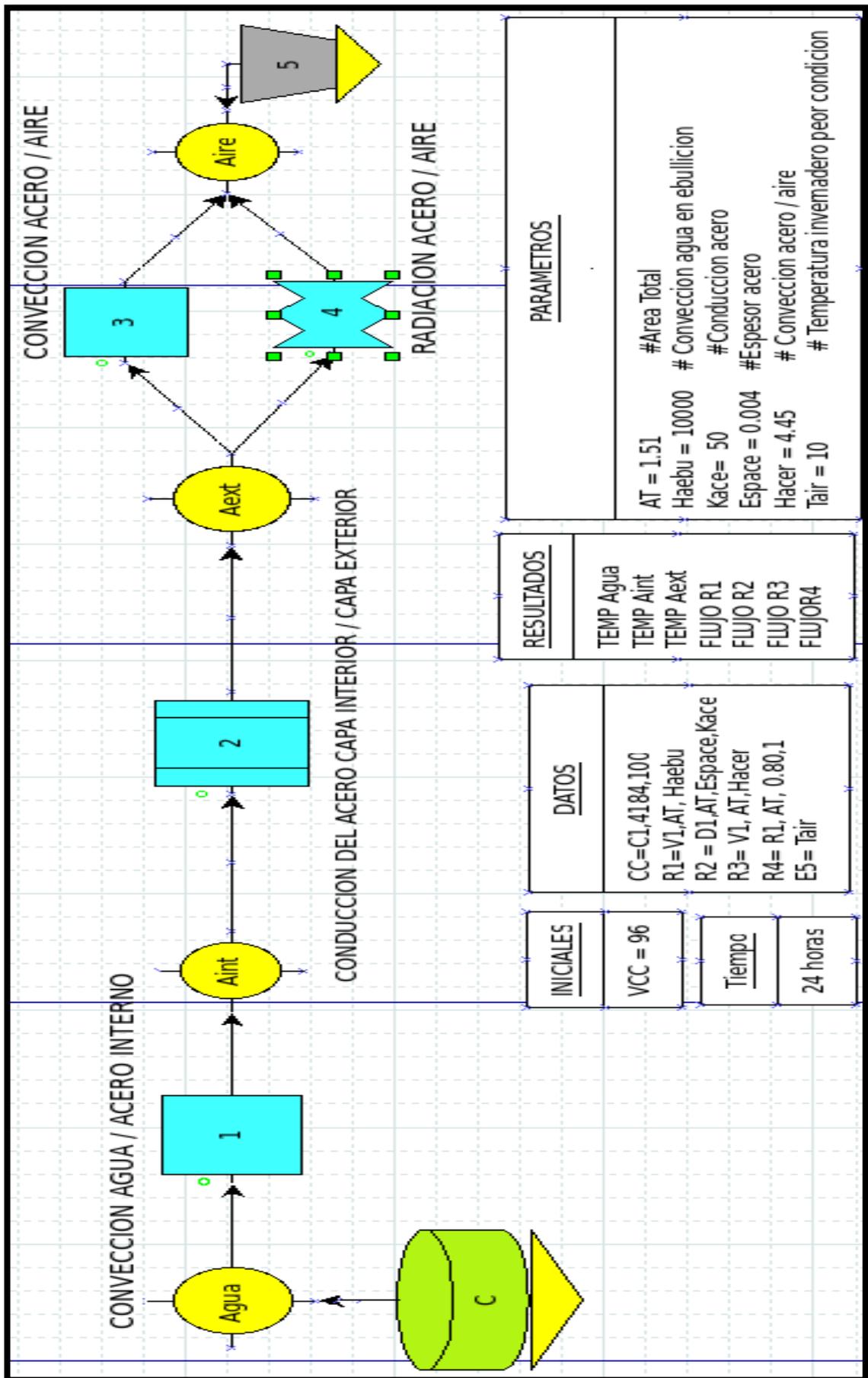


Figura N° 40: Modelo de transferencia de calor en caldera. Fuente de Elaboración Propia.

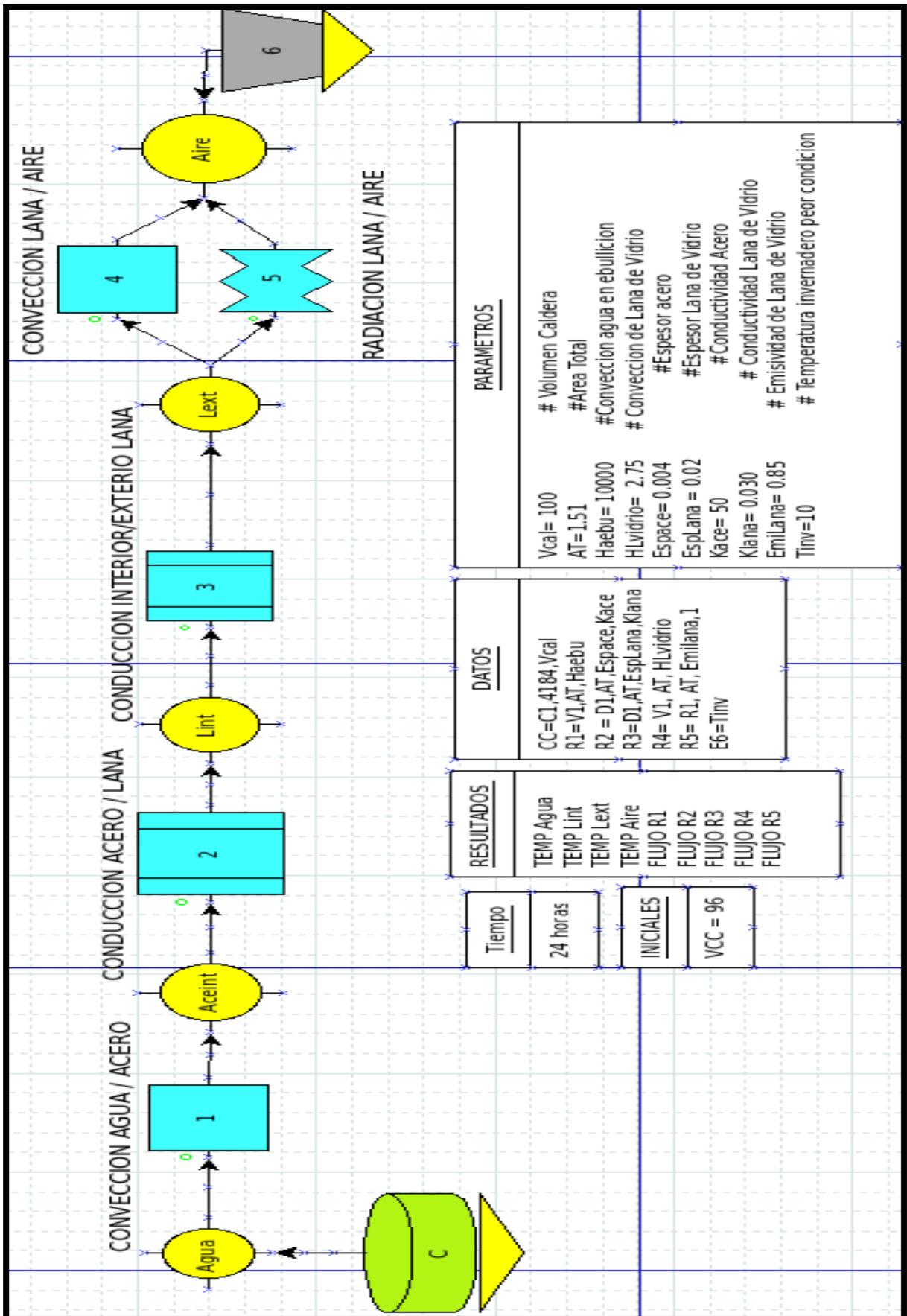


Figura N° 41: Modelo de transferencias de calor en caldera aislada con lana de vidrio. Fuente de Elaboración propia.

ANEXO V: RESULTADOS DE SIMULACIÓN ES DE LA CALDERA SIN Y CON AISLAMIENTO

Tabla N° 29: Nomenclatura de las variables obtenidas como resultado de la simulación con SIMUSOL para la caldera sin aislamiento. Fuente de elaboración propia,2023.

VARIABLES	NOMBRE DE LA VARIABLE
TEMP AGUA	Temperatura del agua.
TEMP Aint	Temperatura de la superficie interna del acero.
TEMP Aext	Temperatura de la superficie externa del acero.
FLUJO R1	Flujo de calor por convección entre el agua y la superficie interna del acero.
FLUJO R2	Flujo de calor por conducción entre la superficie interna y externa del acero.
FLUJO R3	Flujo de calor por convección entre la superficie externa del acero y el aire del invernadero.
FLUJO R4	Flujo de calor por radiación entre la superficie externa del acero y el aire del invernadero.

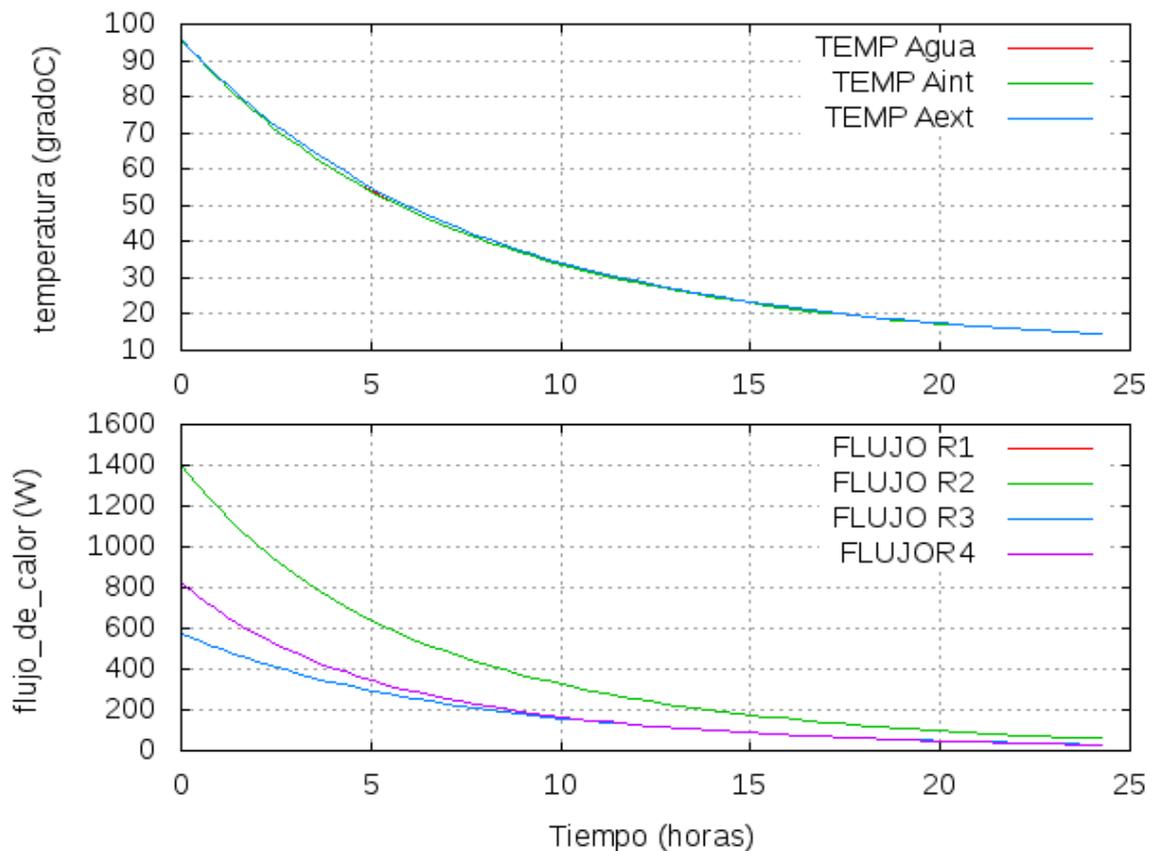


Gráfico N° 4: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) de la caldera sin aislamiento. Fuente de elaboración propia,2023.

Tabla N° 30: Nomenclatura de las variables obtenidas como resultado de la simulación con SIMUSOL para la caldera con aislamiento. Fuente de elaboración propia, 2023.

VARIABLES	NOMBRE DE LA VARIABLE
TEMP AGUA	Temperatura del agua.
TEMP Lint	Temperatura de la superficie interna de lana de vidrio.
TEMP Lext	Temperatura de la superficie externa de la lana de vidrio.
TEMP Aire	Temperatura del aire del invernadero.
FLUJO R1	Flujo de calor por convección entre el agua y la superficie interna del acero.
FLUJO R2	Flujo de calor por conducción entre el acero y la superficie interna de lana de vidrio.
FLUJO R3	Flujo de calor por conducción entre la superficie interna y externa de lana de vidrio.
FLUJO R4	Flujo de calor por convección entre la superficie externa de lana de vidrio y el aire del invernadero.
FLUJO R5	Flujo de calor por radiación entre la superficie externa de lana de vidrio y el aire del invernadero.

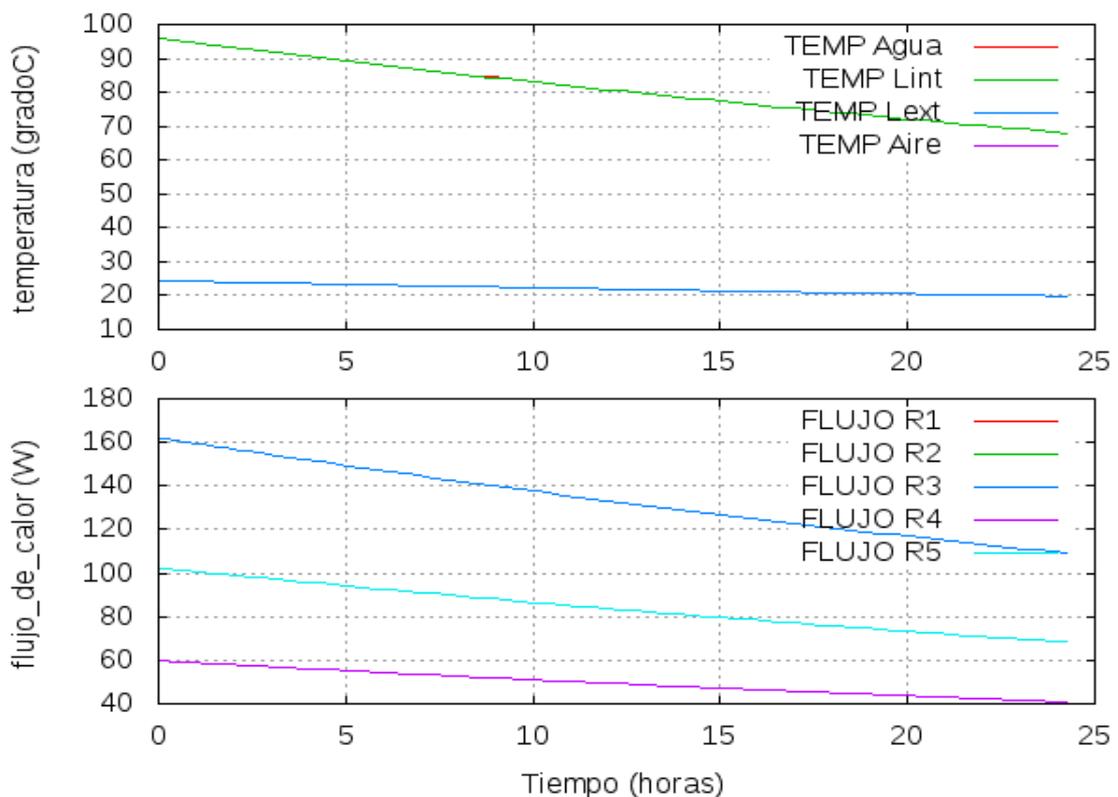


Gráfico N° 5: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) de la caldera aislada con 2,5 cm de espesor de lana de vidrio. Fuente de elaboración propia.

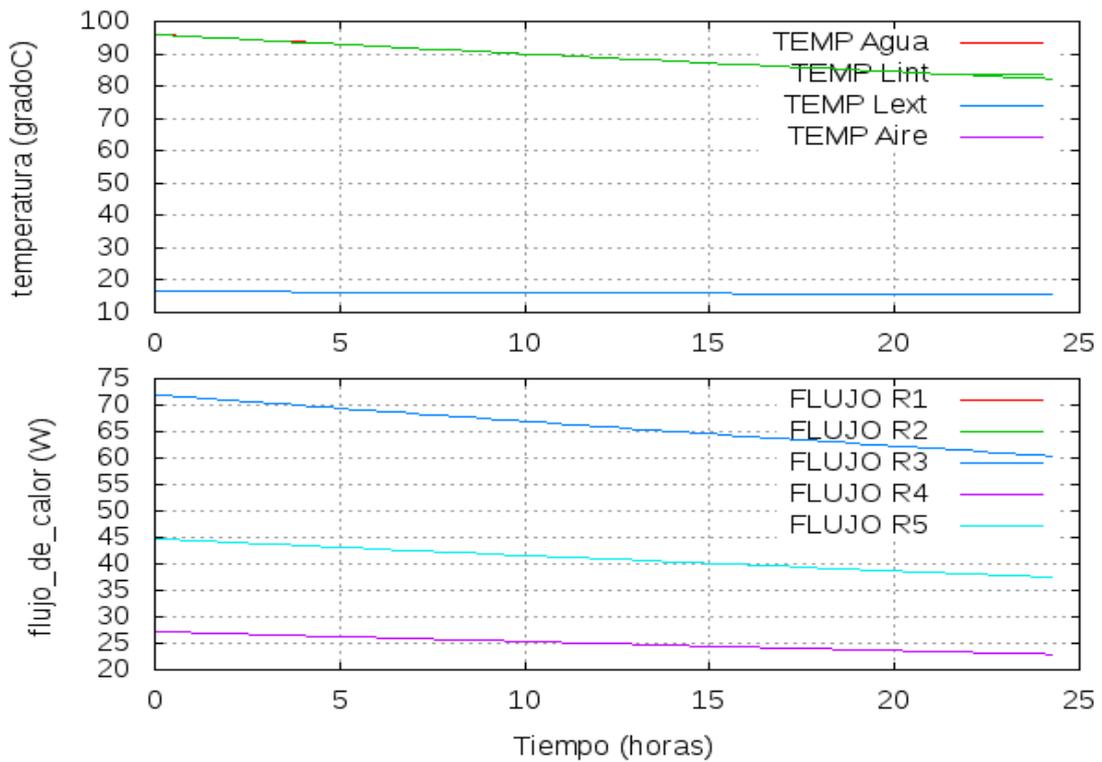


Gráfico N° 6: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) de la caldera aislada con 5 cm de espesor de lana de vidrio. Fuente de elaboración propia.

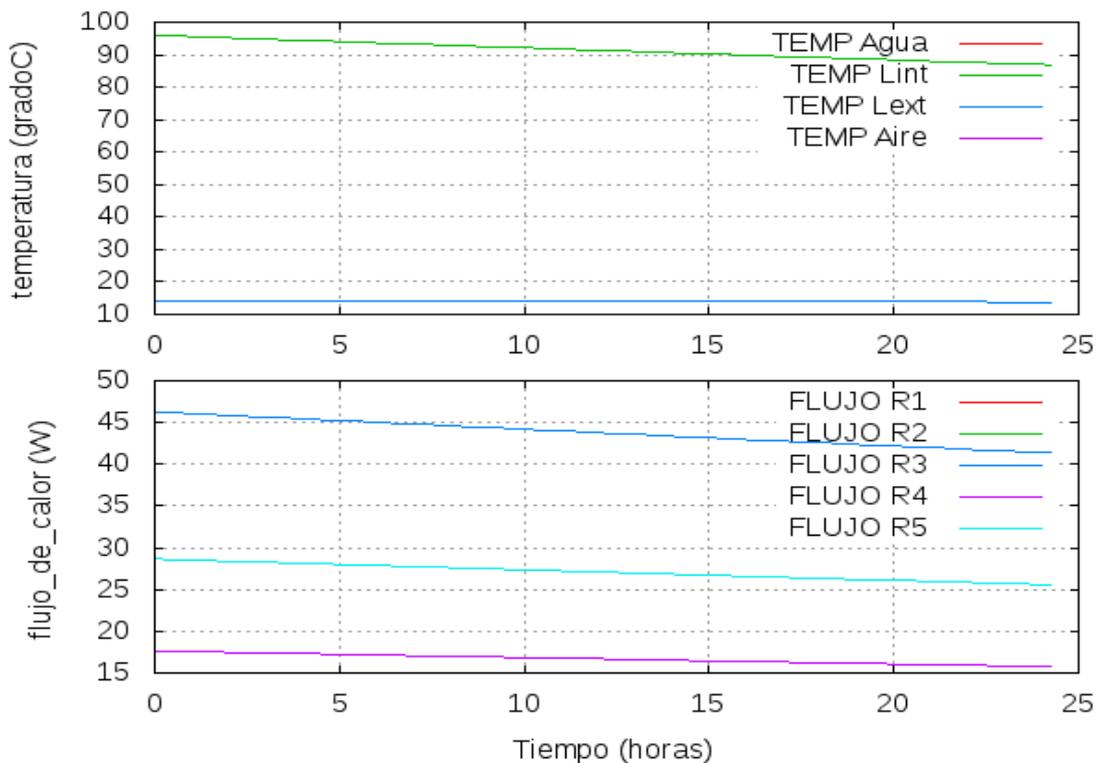


Gráfico N° 7: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) de la caldera aislada con 8 cm de espesor de lana de vidrio. Fuente de elaboración propia.

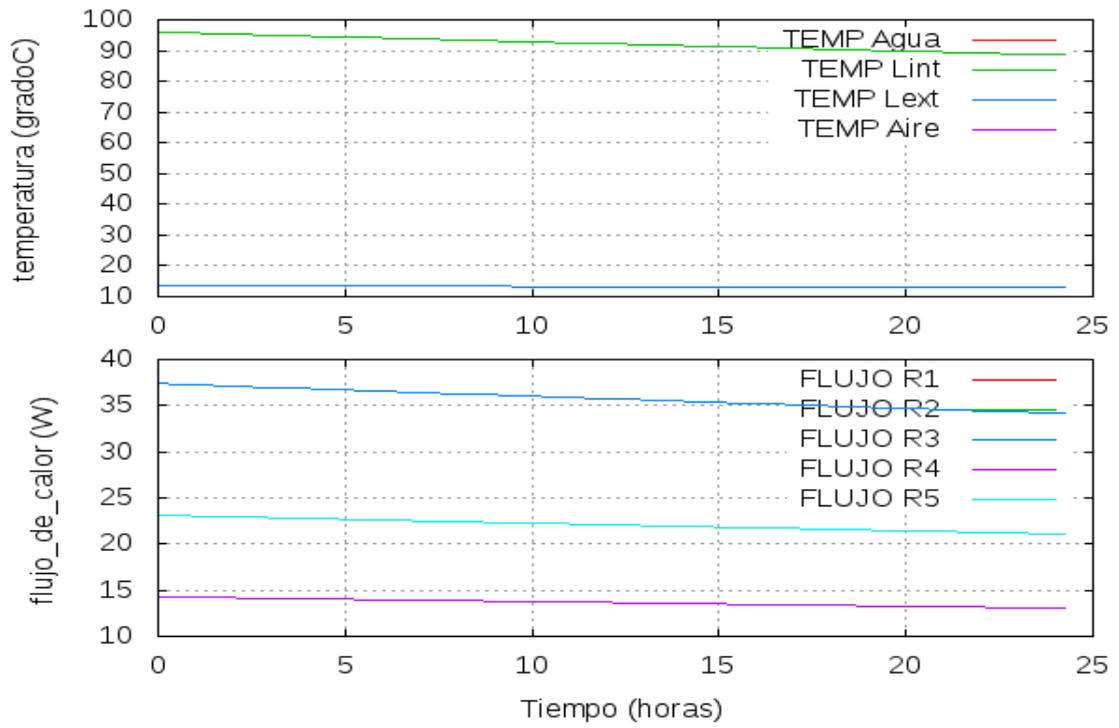


Gráfico N° 8: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) de la caldera aislada con 10cm de espesor de lana de vidrio. Fuente de elaboración propia.

ANEXO VI: CÁLCULO COEFICIENTE DE CONVECCIÓN DEL BIODIGESTOR SIN AISLAMIENTO

El biodigestor se prevé que esté enterrado hasta el techo, por lo que la parte superior estará expuesta a las condiciones atmosféricas del exterior. Ya sea que se trate de una convección natural o forzada, la manera de determinar el coeficiente convectivo (H_{COV}) es resolviendo la ecuación N° 12. Para ello, es necesario conocer el Número de Nusselt (Nu) por medio de la ecuación N°17, sabiendo que la parte superior del biodigestor estará expuesta al aire y sometida a una convección forzada.

El sustrato del biodigestor está mayoritariamente conformado por agua líquida; por ende, se asume un coeficiente convectivo (H_{COV}) de $500 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ para el sustrato, el mismo que para el agua líquida bajo dichas condiciones (Incropera, 1999).

Ecuación N° 17: Número de Nusselt (Nu) para Convección Forzada (Incropera, 1999).

$$\text{Nu} = C \cdot \text{Re}^{(m)} \cdot \text{Pr}^{(n)}$$

Donde:

- C, m y n son términos independientes de la naturaleza del fluido
- Pr: Numero de Prandtl (Pr)
- Re: Numero de Reynolds (Re)

Previo al cálculo del Numero de Nusselt (Nu), se debe considerar los siguientes supuestos:

- Temperatura media del aire en invierno (peor condición) = $8,2^\circ - 281,2 \text{ K}$
- Temperatura exterior del plástico: = $8,3^\circ \text{ C} - 281,3 \text{ K}$

A partir, de ambas temperaturas se procede a calcular la Temperatura en la capa Limite o Temperatura de película (T_f). (Ver Ecuación N° 13).

$$T_f = \frac{1}{2} \cdot (8,3^\circ \text{ C} + 8,2^\circ \text{ C})$$

$$T_f = 8,25^\circ \text{ C}$$

Entonces, la temperatura de la película límite (T_f) es de $8,25^\circ \text{ C}$. Esto se utiliza para determinar las propiedades físicas del aire a una presión de 1 atmósfera (atm), que ya se encuentran tabuladas en Çengel (2011). Utilizando la tabla de Çengel (2011), para una T_f de $8,25^\circ \text{ C}$, las propiedades termofísicas correspondientes del aire son:

- K conductividad del aire ($\text{W/m} \cdot ^\circ \text{ C}$) = **0,02439**
- Viscosidad cinemática (V_c) (m^2/s) = **$1,426 \cdot 10^{-5}$**
- Número de Prandtl, Pr = **0,7336**

El movimiento de las corrientes del aire alrededor del techo del biodigestor influirá en si se trata de un flujo laminar o turbulento. Para determinar si se trata de un flujo u otro, se debe calcular el número de Reynolds (Re) siguiendo la metodología del Capítulo 7 de Incropera (1999, página 368-370) y a (Mejía, 2022).

Ecuación N° 18: Número de Reynolds (Re).

$$\text{Re} = D \cdot V / \nu$$

Donde:

- D: Diámetro
- V: Velocidad media del viento en la zona (m/s)
- ν : Viscosidad cinemática (m²/s)

Entonces tenemos para la superficie circular de arriba del biodigestor:

- D= 1,5m
- V= 1,33 m/s
- $\nu= 0,00001338 \text{ m}^2/\text{s}$
- $\text{Re} = (1,5 \cdot 1,33) / 0,00001426 = \mathbf{139.901,82}$

El número de Reynolds (Re) expresa que se trata de un flujo turbulento porque su valor es mayor a 4.000. Para conocer el número adimensional C y m que corresponden para el cálculo del Número de Nusselt (Ne), se debe mirar en la tabla de Incropera (1999, pág. 370). Como el Re es igual a **139.901,82**, según la tabla, los valores correspondientes son **C = 0,027** y **m = 0,805**.

Una vez que se tienen los valores de C y m, se evalúa el número de Prandtl (Pr) para averiguar el valor de n necesario para el cálculo del Número de Nusselt (Ne). El número de Prandtl (Pr) es 0,7336, ya que se trata de un valor menor a 10, le corresponde un n = 0,37 (Incropera, 1999, pág. 370).

Al calcular el número de Nusselt (Ne), reemplazando los valores correspondientes en la ecuación N°20, se obtiene un Nu igual a 334,17.

- $\text{Nu} = 0,027 \cdot 139.901,82^{0,805} \cdot 0,7336^{0,37} =$
- **Nu = 334,17**

Una vez obtenido el Numero de Nusselt (Nu) se procede a averiguar el coeficiente convectivo aplicando la ecuación N°12.

$$H_{\text{cov}} = ((0,02364 \text{ W/m} \cdot \text{°C}) / 1,5 \text{ m}) \cdot 334,17 =$$

$$\mathbf{H_{\text{cov}} = 5,26 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

El coeficiente convectivo (Hcov) de la superficie circular de plástico del biodigestor expuesta a las condiciones climáticas de la zona del penal es de 5,26 W/m² * °C. Una vez obtenido este valor, se utilizará en el software SIMUSOL para observar el comportamiento térmico del biodigestor.

ANEXO VII: CÁLCULO COEFICIENTE DE CONVECCIÓN DEL BIODIGESTOR AISLADO CON TERGOPOL

A partir de los resultados obtenidos de la simulación para el biodigestor sin aislamiento, se hace indispensable sugerir una propuesta de mejora del aislamiento térmico para garantizar que la fluctuación térmica no supere los 0,6°C/día. Para ello, se pretende colocar Poliestireno expandido (EPS), conocido comúnmente en Argentina como "Telgopor", como aislante para disminuir las pérdidas de transferencia de calor que tienen principalmente el biodigestor hacia el suelo y, en menor medida, hacia el aire.

El EPS es elegido como aislante debido a su baja conductividad térmica ($k= 0,030 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), su resistencia al paso de la humedad y el agua y su capacidad para resistir temperaturas de hasta 100°C. ANAPE (Asociación Nacional de Poliestireno Expandido), 2003. Por lo tanto, resulta un material apropiado para aislar térmicamente al biodigestor del entorno circundante.

Para calcular el coeficiente de convección del EPS que resulta necesario para las modelaciones en el software SIMUSOL, y estimar así la variación térmica que posee el biodigestor aislado con diferentes espesores del aislante y condiciones climáticas, se debe:

- Incorporar al modelo del biodigestor sin aislamiento un aislante de EPS de 2 cm de espesor.
- Asumir una condición de temperatura media invierno para el aire de la zona del penal de 8,2°C.
- Realizar las simulaciones y solicitar al programa que devuelva la temperatura de la superficie exterior del aislante para la parte superior (techo) del biodigestor, expuesta al aire exterior.

La simulación devuelve un valor para la temperatura exterior del EPS de 8,3 °C para una condición de invierno de 8,2 °C y un espesor mínimo de 2 cm. Una vez conocido esto, se realiza el mismo procedimiento que para el biodigestor sin aislamiento, con el objetivo de determinar el coeficiente de convección (H_{cov}) del EPS que se va a considerar en las simulaciones es del comportamiento térmico del biodigestor aislado con diferentes espesores de aislante.

Si se observa, la temperatura exterior del EPS simulada, es igual a la superficie superior de polietileno del Biodigestor sin aislar (8,3°C). Por lo tanto, si se aplica el mismo procedimiento que para el cálculo del coeficiente convectivo del polietileno (plástico), se obtiene un coeficiente convectivo (H_{cov}) de $5,26 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ para la superficie circular superior de EPS del biodigestor expuesta a las condiciones climáticas de la zona del penal.

ANEXO VIII: MODELOS DE TRANFERENCIA DE CALOR DEL BIODIGESTOR SIN AISLAMIENTO

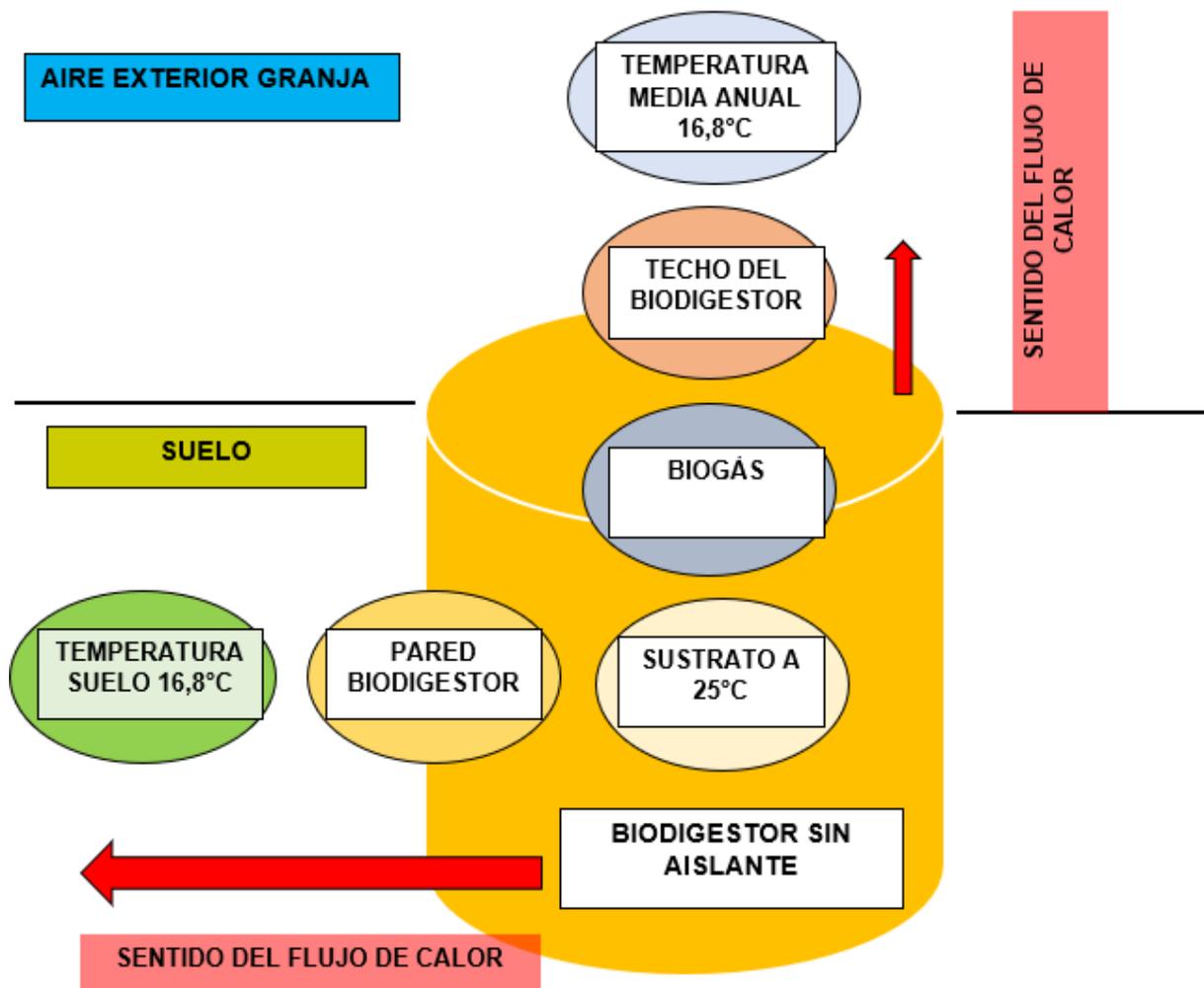


Figura N° 42: Modelo esquemático sencillo con los principales nodos de transferencia de calor utilizados en la simulación con SIMUSOL para biodigestor sin aislamiento. Fuente de elaboración propia, 2023.

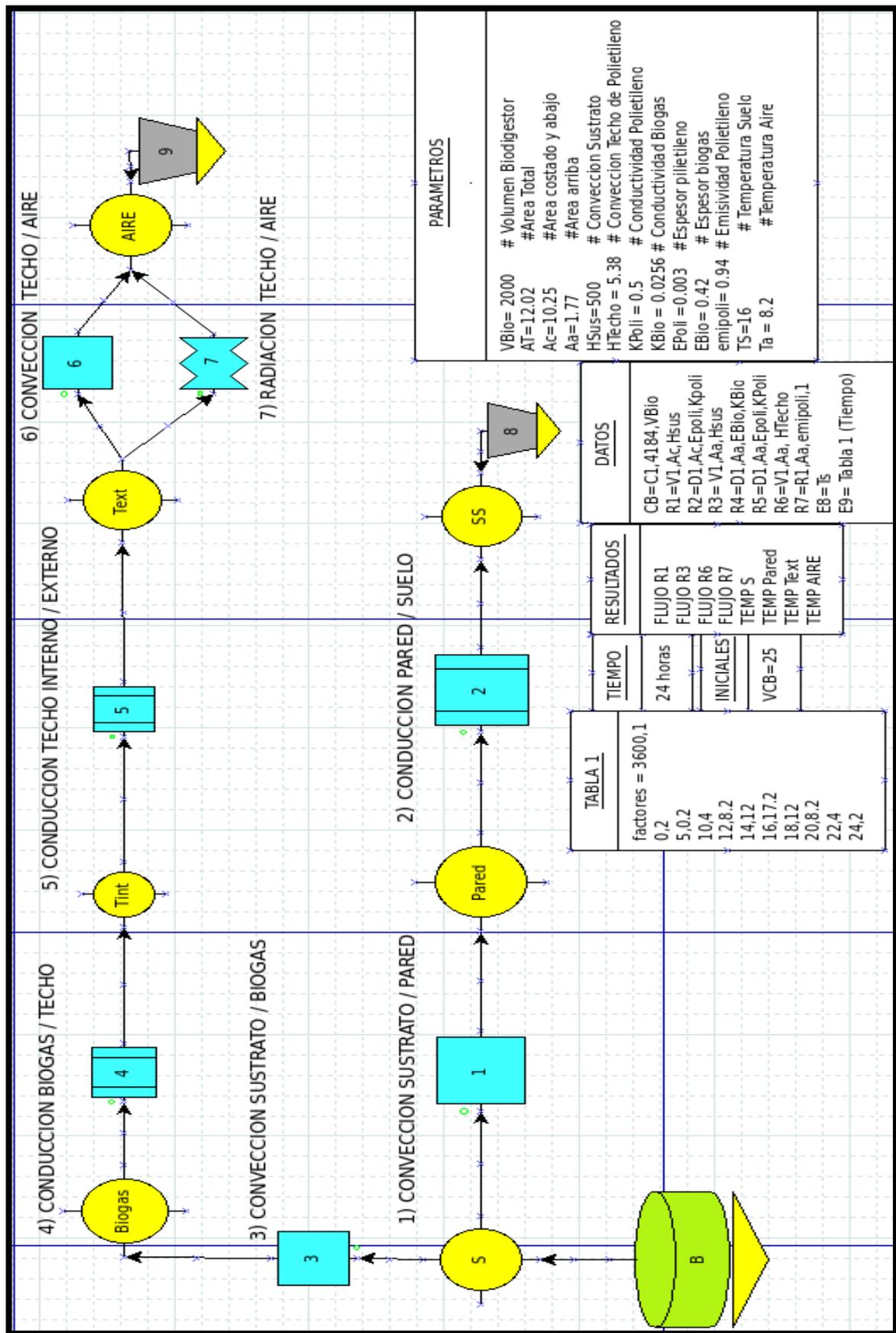


Figura N° 43: Modelo de transferencia de calor del biodigestor. Fuente de elaboración propia

ANEXO IX: MODELOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR DEL BIODIGESTOR CON AISLAMIENTO

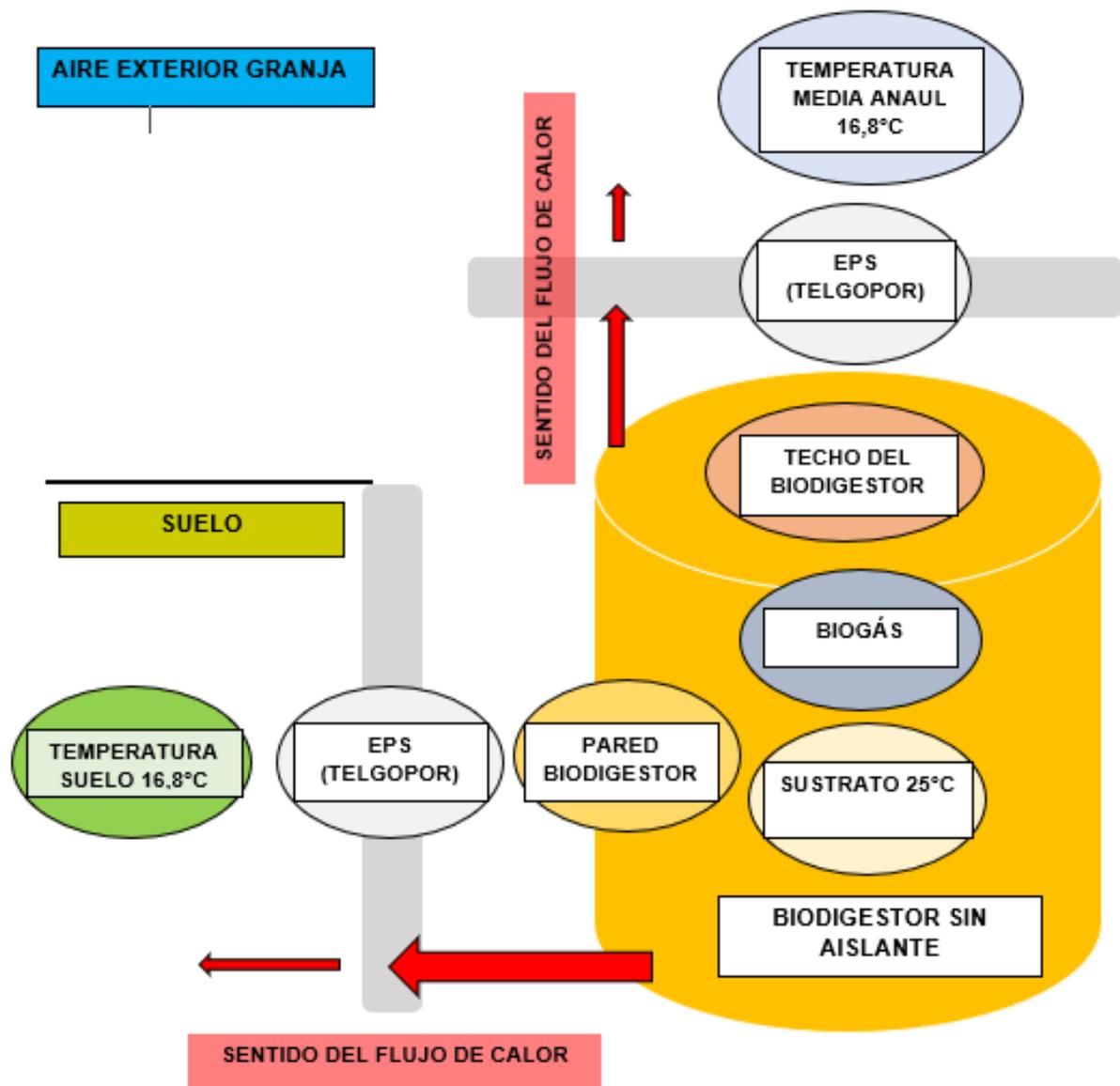


Figura N° 44: Modelo esquemático sencillo con los principales nodos de transferencia de calor utilizados en la simulación con SIMUSOL para biodigestor con aislamiento. Fuente de elaboración propia, 2023.

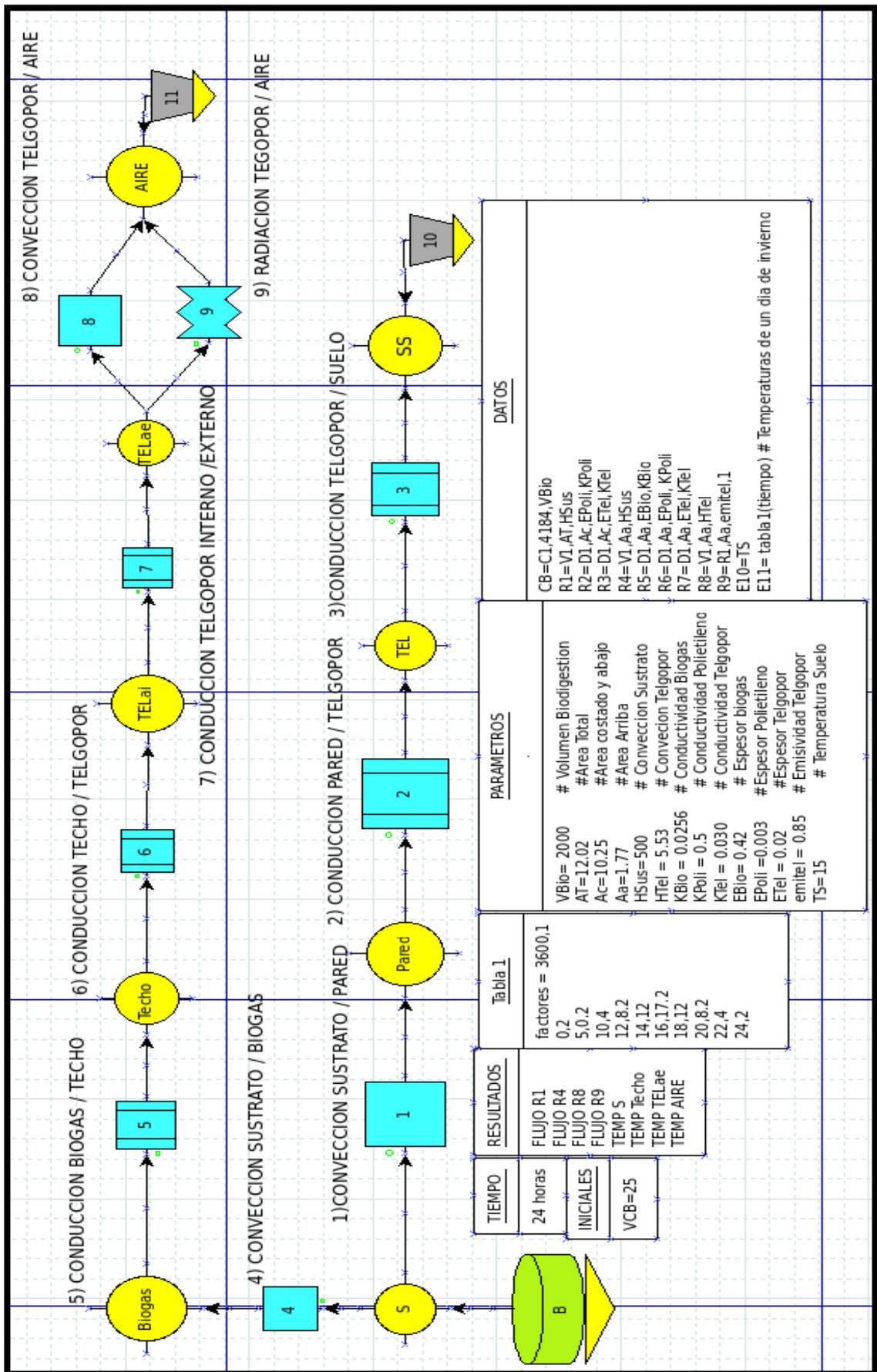


Figura N° 45: Modelo de transferencia de calor del Biodigestor con aislamiento de EPS. Fuente de elaboración propia.

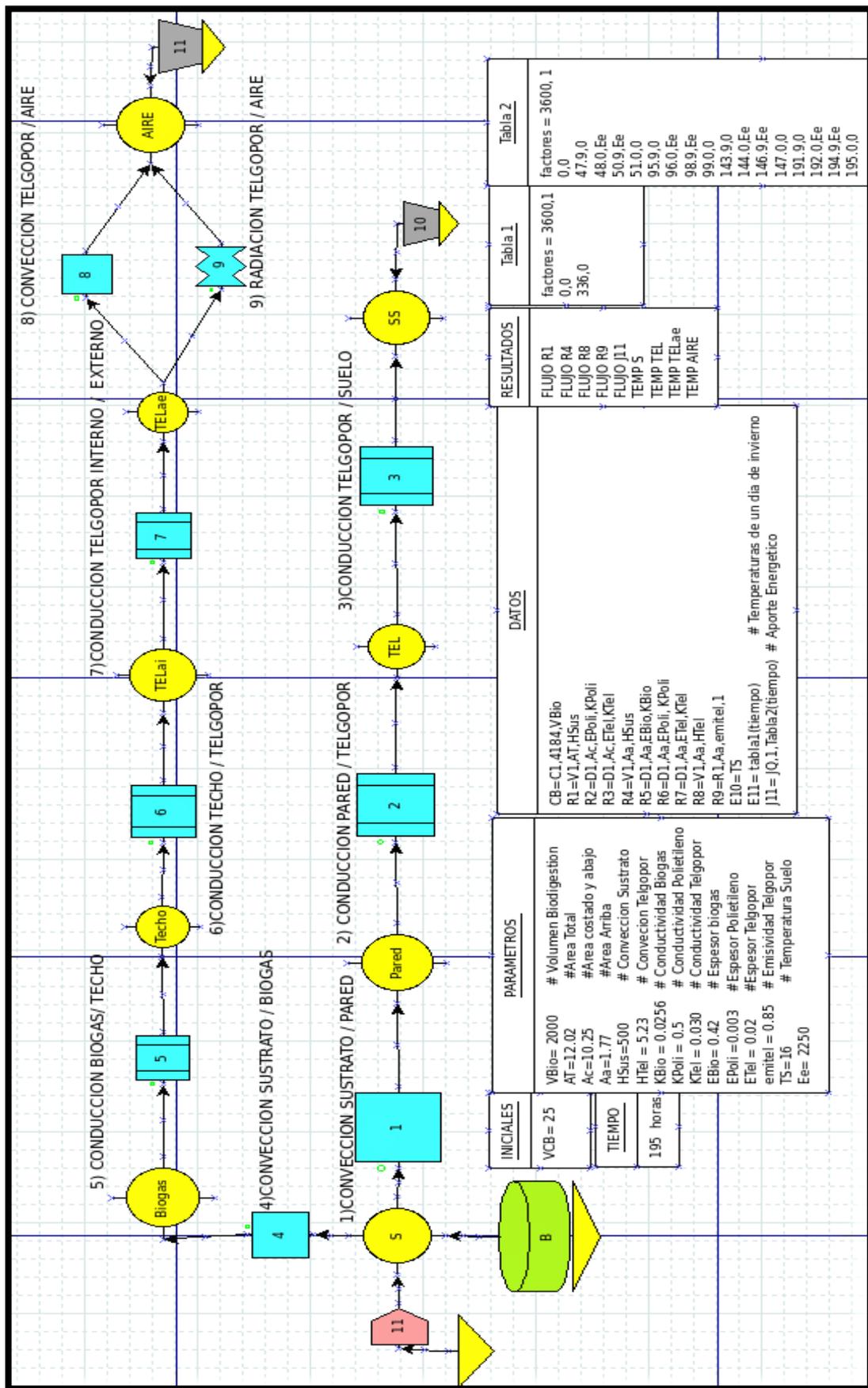


Figura N° 46: Modelo de transferencias de calor el Biodigestor con aislamiento de EPS y calefacción. Fuente de elaboración propia.

ANEXO X: RESULTADOS DE SIMULACIÓN ES DEL BIODIGESTOR SIN AISLAMIENTO

Tabla N° 31: Nomenclatura de las variables obtenidas como resultado de la simulación con SIMUSOL para el biodigestor sin aislamiento. Fuente: Elaboración propia, 2023.

VARIABLES	NOMBRE DE LA VARIABLE
TEMP S	Temperatura del Sustrato.
TEMP Pint	Temperatura de la superficie de la pared del biodigestor.
TEMP PintA	Temperatura del techo del biodigestor.
TEMP Aire	Temperatura del aire de la granja.
FLUJO R1	Flujo de calor por convección entre el sustrato y la pared del biodigestor.
FLUJO R2	Flujo de calor por conducción entre la pared del biodigestor y el suelo.
FLUJO R3	Flujo de calor por convección entre el sustrato y el biogás
FLUJO R4	Flujo de calor por conducción entre el biogás y el techo del biodigestor.
FLUJO R5	Flujo de calor por convección entre el techo del biodigestor y el aire de la granja
FLUJO R6	Flujo de calor por radiación entre el techo del biodigestor y el aire de la granja.

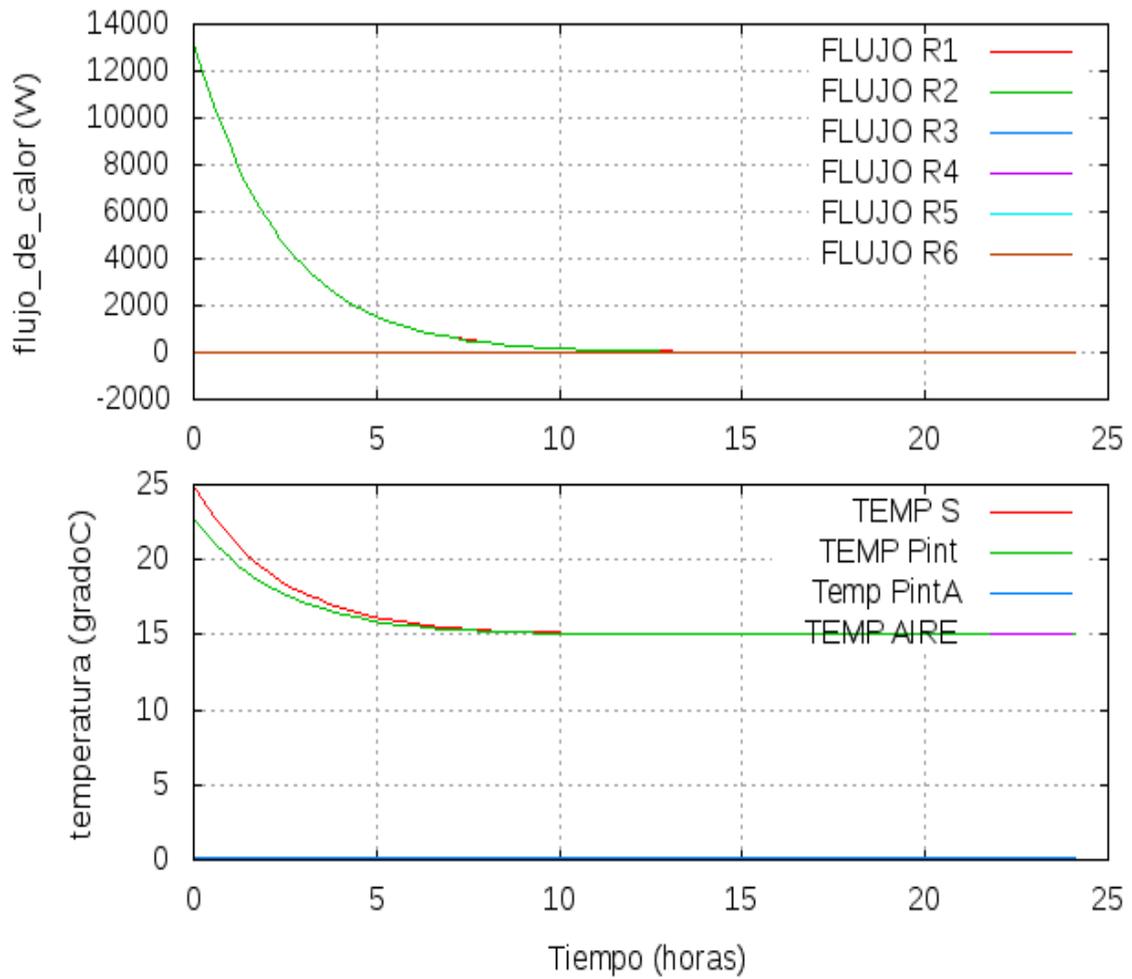


Gráfico N° 9: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor sin aislamiento. Elaboración propia.

ANEXO XI: RESULTADOS DE SIMULACIÓN ES DEL BIODIGESTOR CON AISLAMIENTO

Tabla N° 32: Nomenclatura de las variables obtenidas como resultado de la simulación con SIMUSOL para el biodigestor con aislamiento. Fuente: Elaboración propia,2023.

VARIABLES	NOMBRE DE LA VARIABLE
TEMP S	Temperatura del Sustrato.
TEMP TELae	Temperatura de la superficie exterior del EPS(Telgopor).
TEMP Techo	Temperatura del techo del biodigestor.
TEMP Aire	Temperatura del aire de la granja.
FLUJO R1	Flujo de calor por convección entre el sustrato y la pared del biodigestor.
FLUJO R4	Flujo de calor por conducción entre la placa de EPS (Telgopor) y el suelo.
FLUJO R8	Flujo de calor por convección entre la superficie exterior del EPS y el aire exterior.
FLUJO R9	Flujo de calor radiación entre la superficie exterior del EPS y el aire exterior.

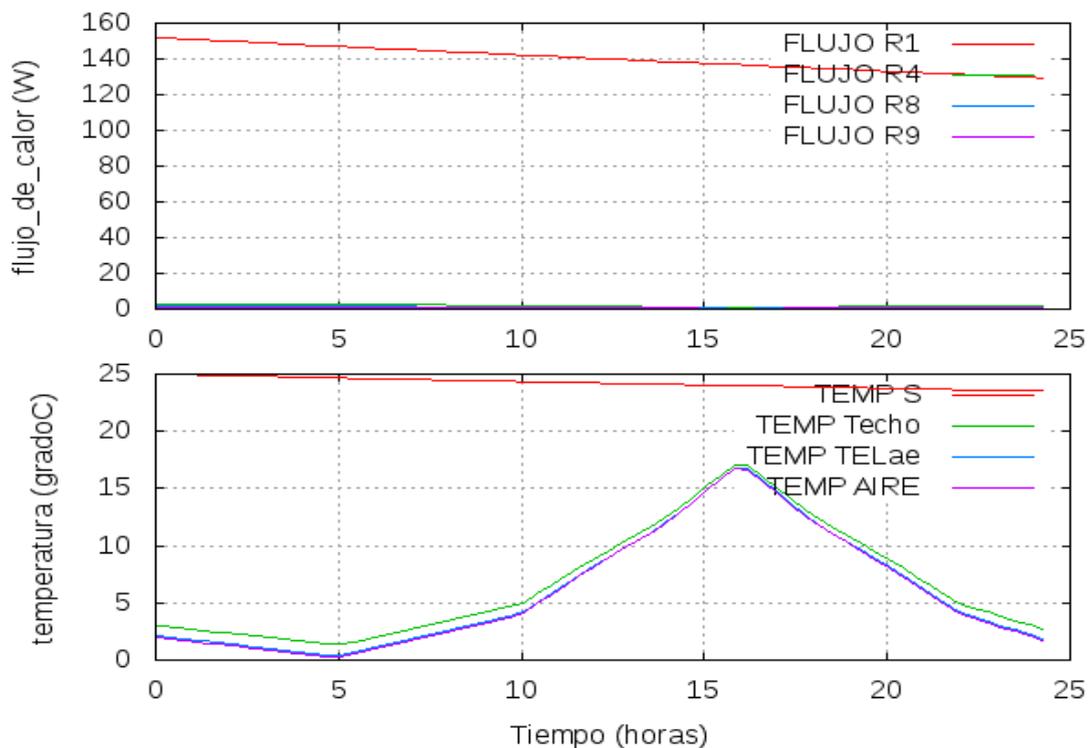


Gráfico N° 10: Nomenclatura de las variables obtenidas como resultado de la simulación con SIMUSOL para el biodigestor con aislamiento. Fuente de elaboración propia,2023.

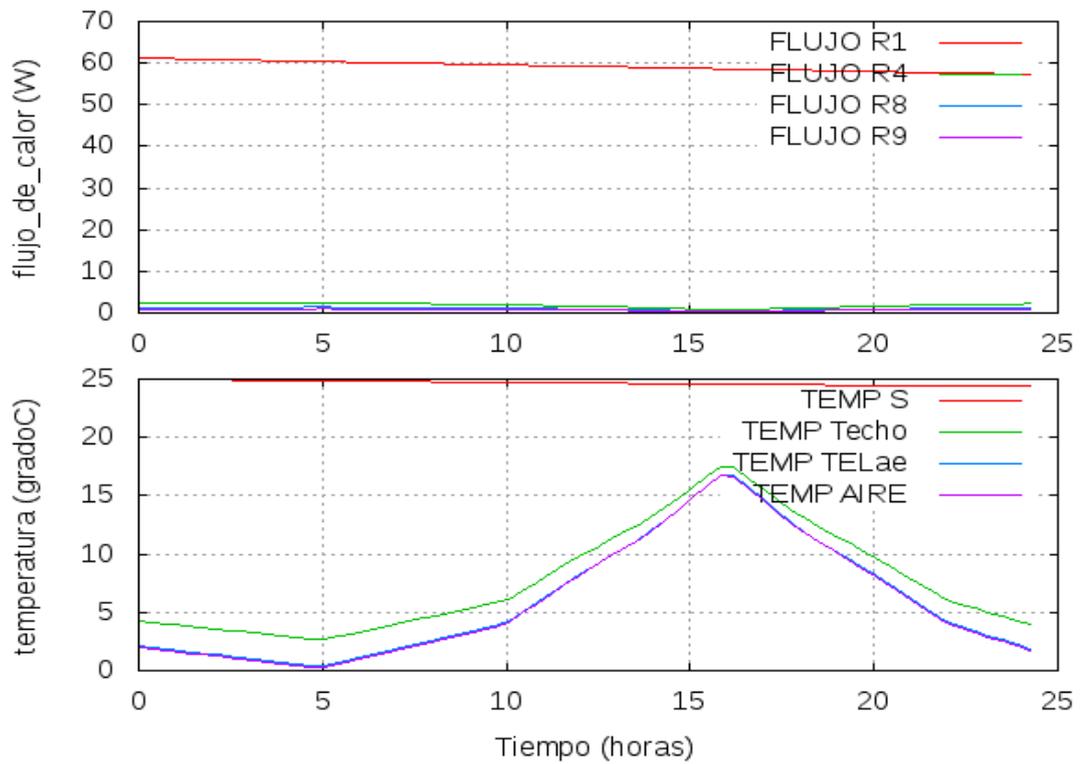


Gráfico N° 11: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 5 cm de EPS. Fuente de elaboración propia.

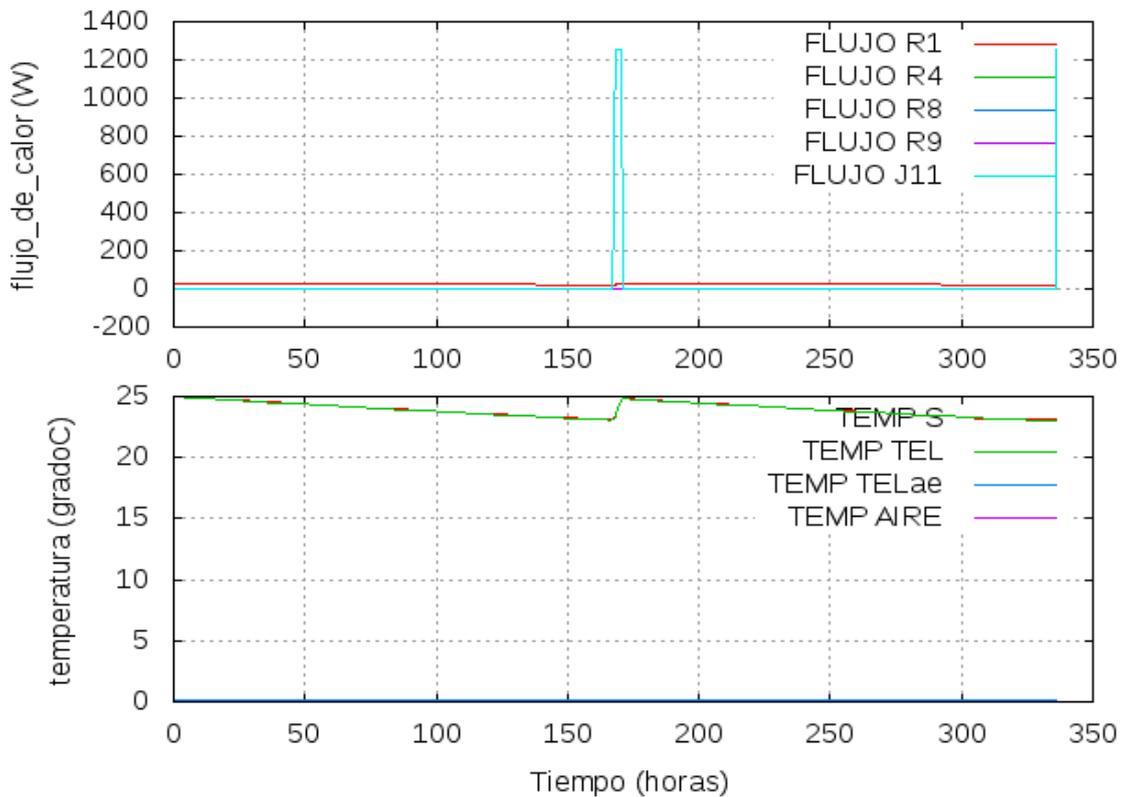


Gráfico N° 12: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 10 cm de EPS. Fuente de elaboración propia.

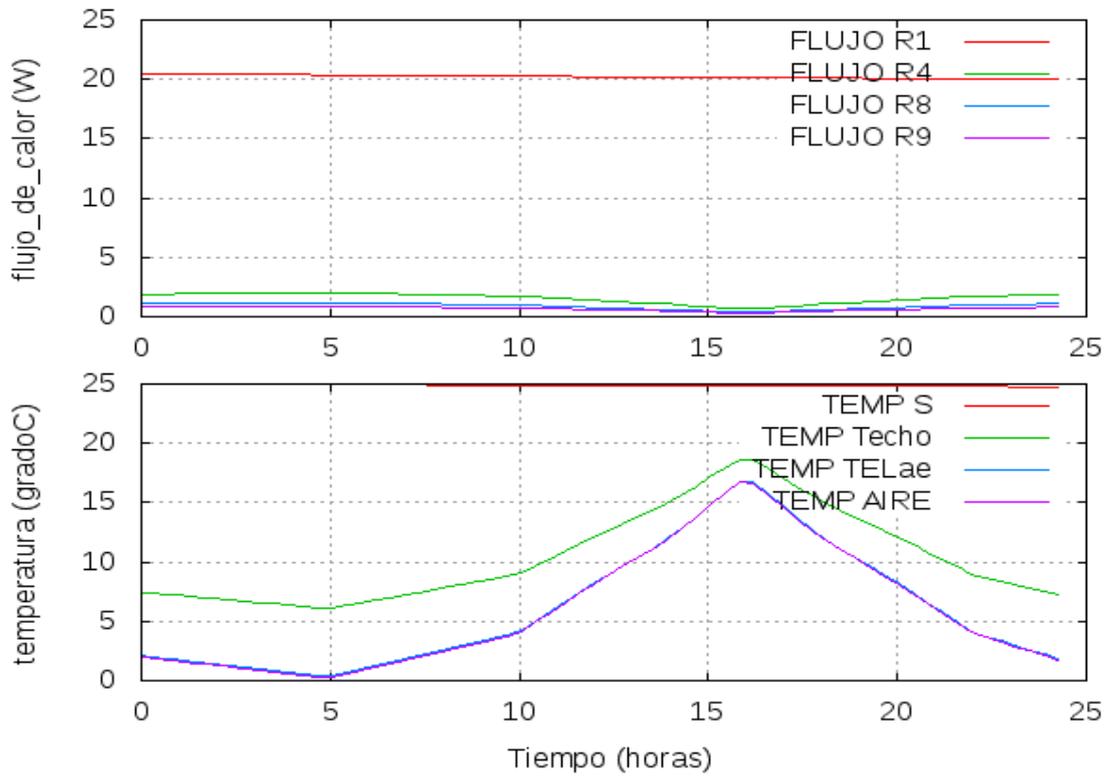


Gráfico N° 13: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 15 cm de EPS. Fuente de elaboración propia.

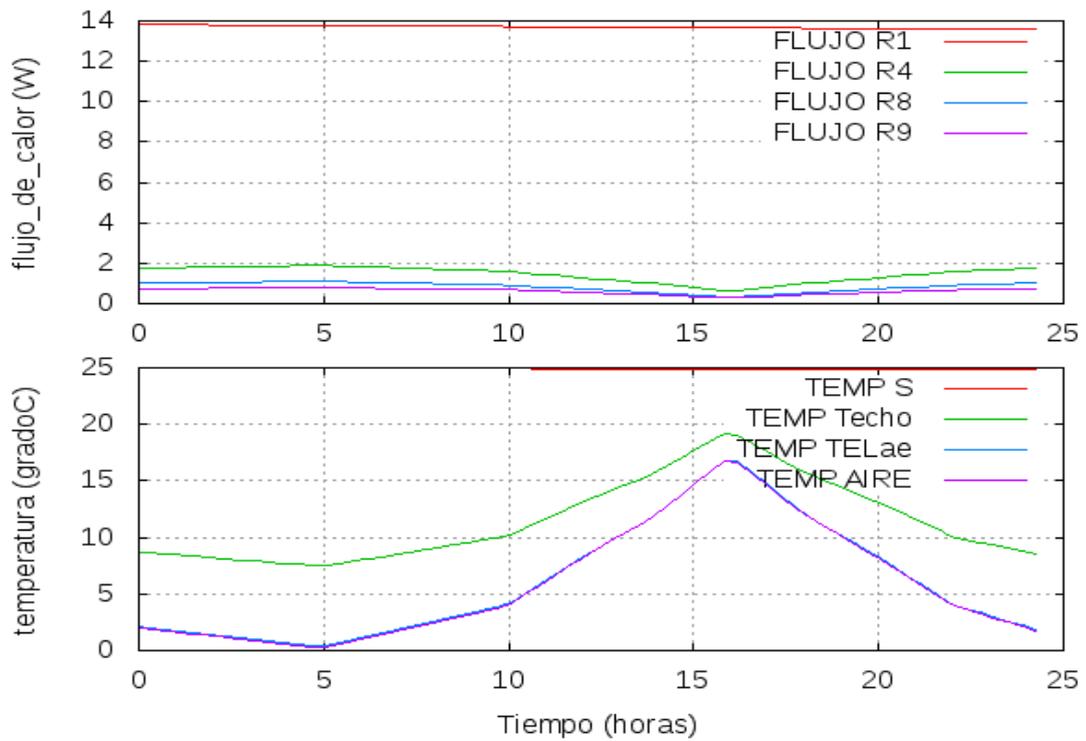


Gráfico N° 14: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 20 cm de EPS. Fuente de elaboración propia.

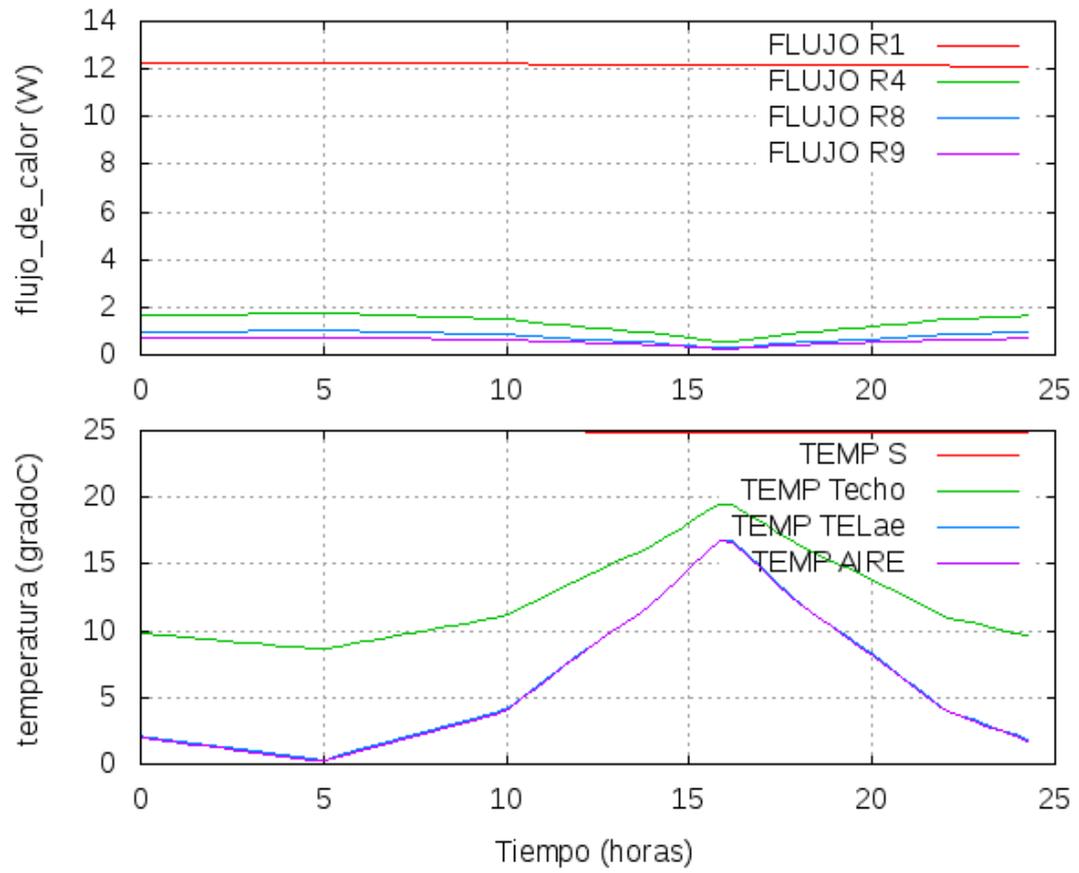


Gráfico N° 15: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 25 cm de EPS. Fuente de elaboración propia.

ANEXO XII: RESULTADOS DE SIMULACIONES DEL BIODIGESTOR AISLADO Y CALEFACCIONADO

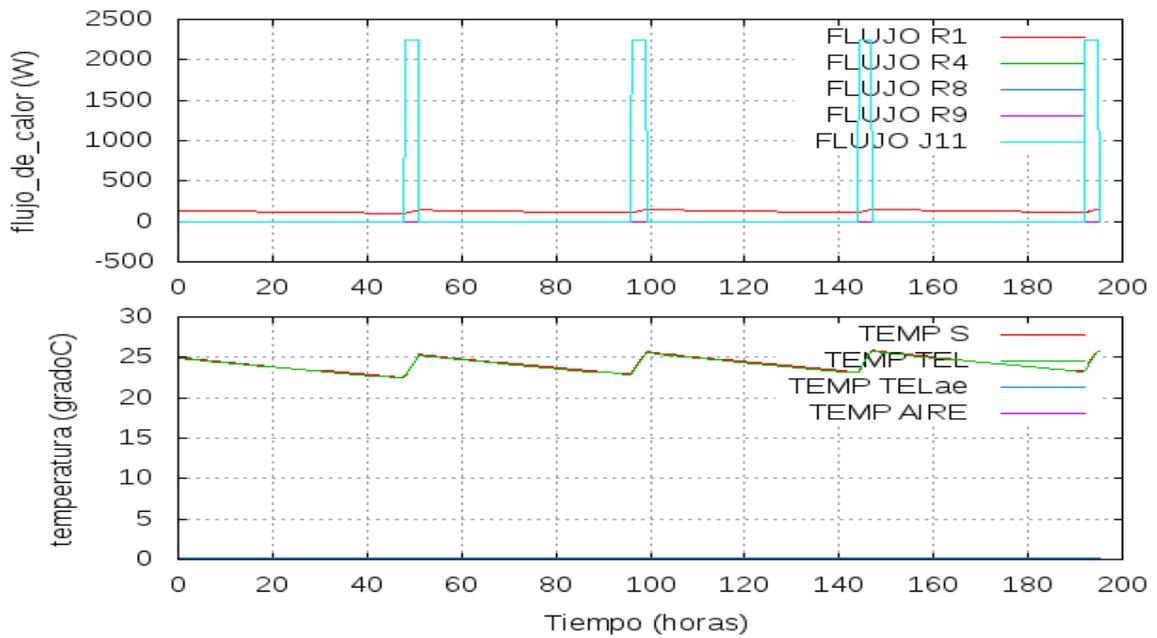


Gráfico N° 16: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 2 cm de EPS y calefaccionado. Fuente de elaboración propia.

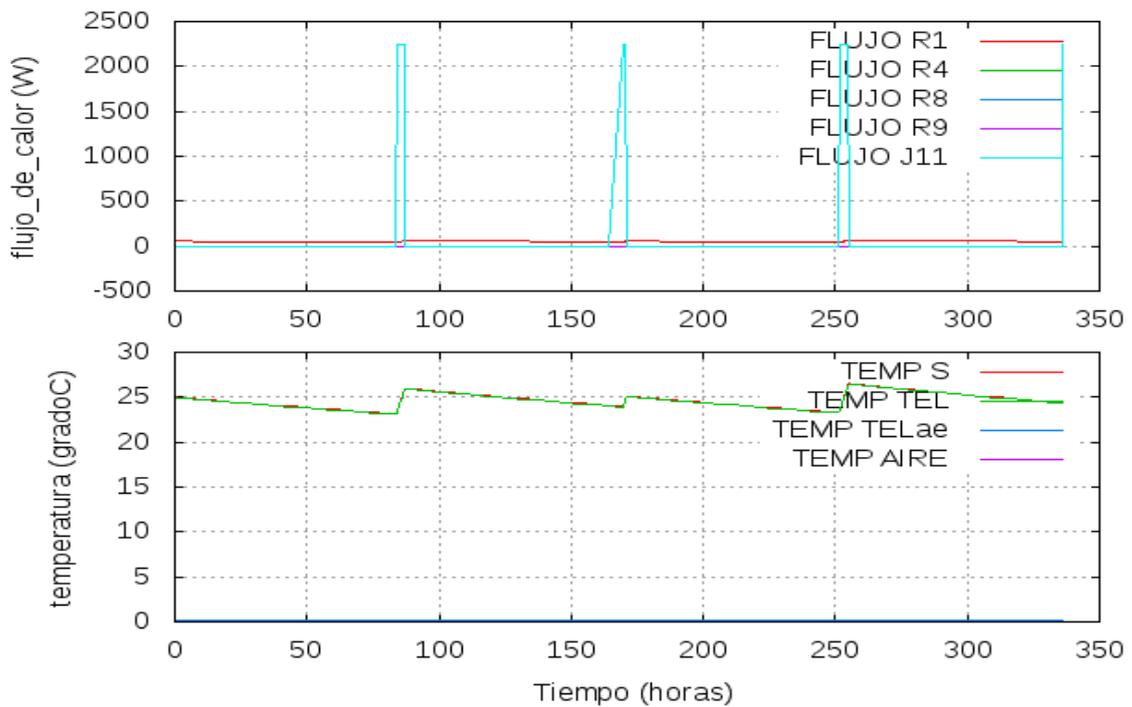


Gráfico N° 17: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 5 cm de EPS y calefaccionado. Fuente de elaboración propia.

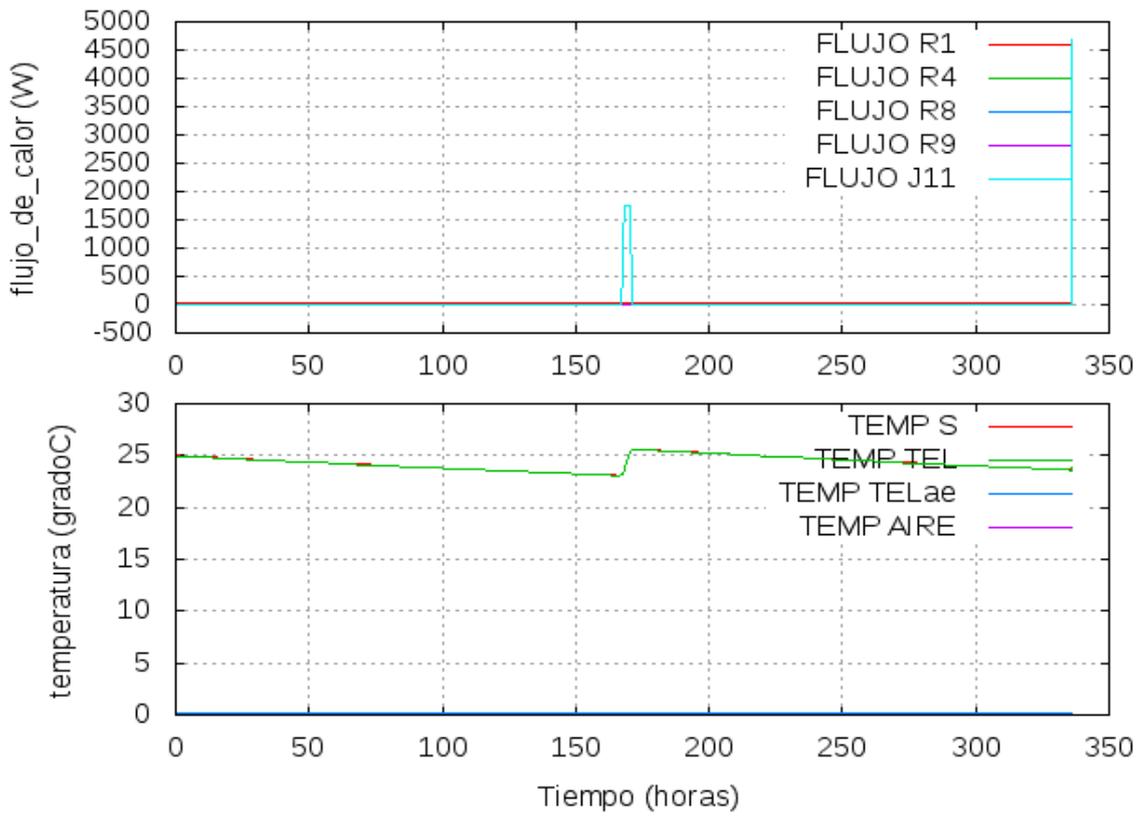


Gráfico N° 18: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 10 cm de EPS y calefaccionado. Fuente de elaboración propia.

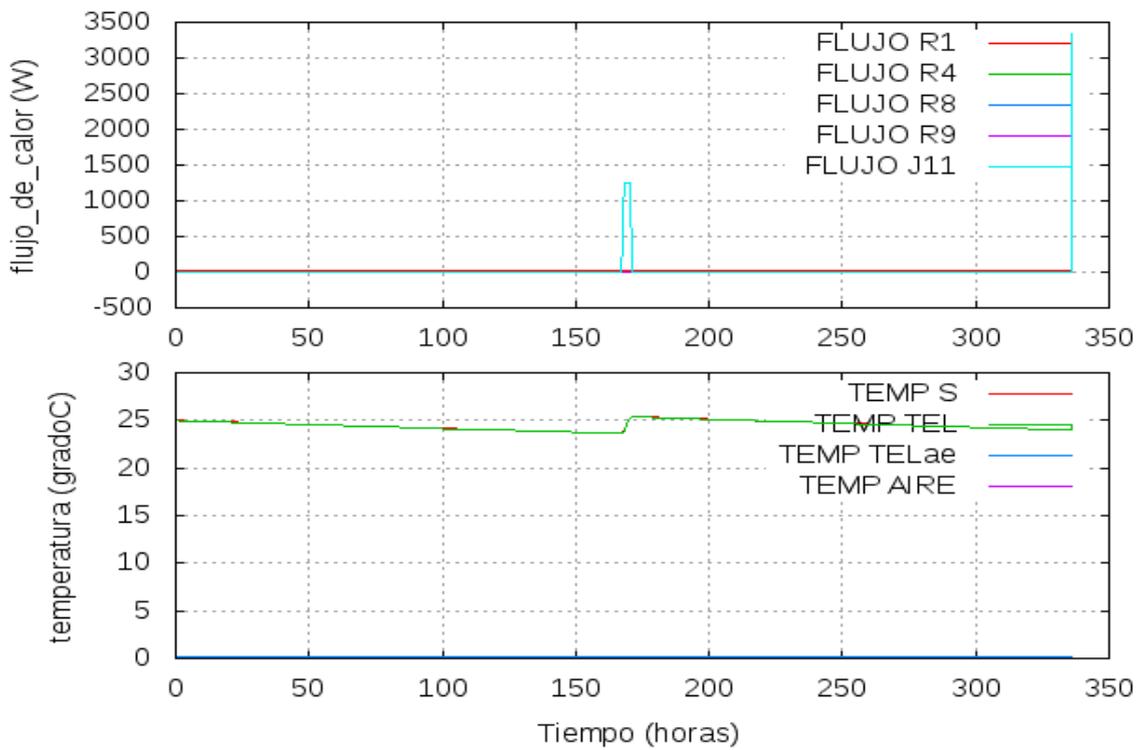


Gráfico N° 19: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 15 cm de EPS y calefaccionado. Fuente de elaboración propia.

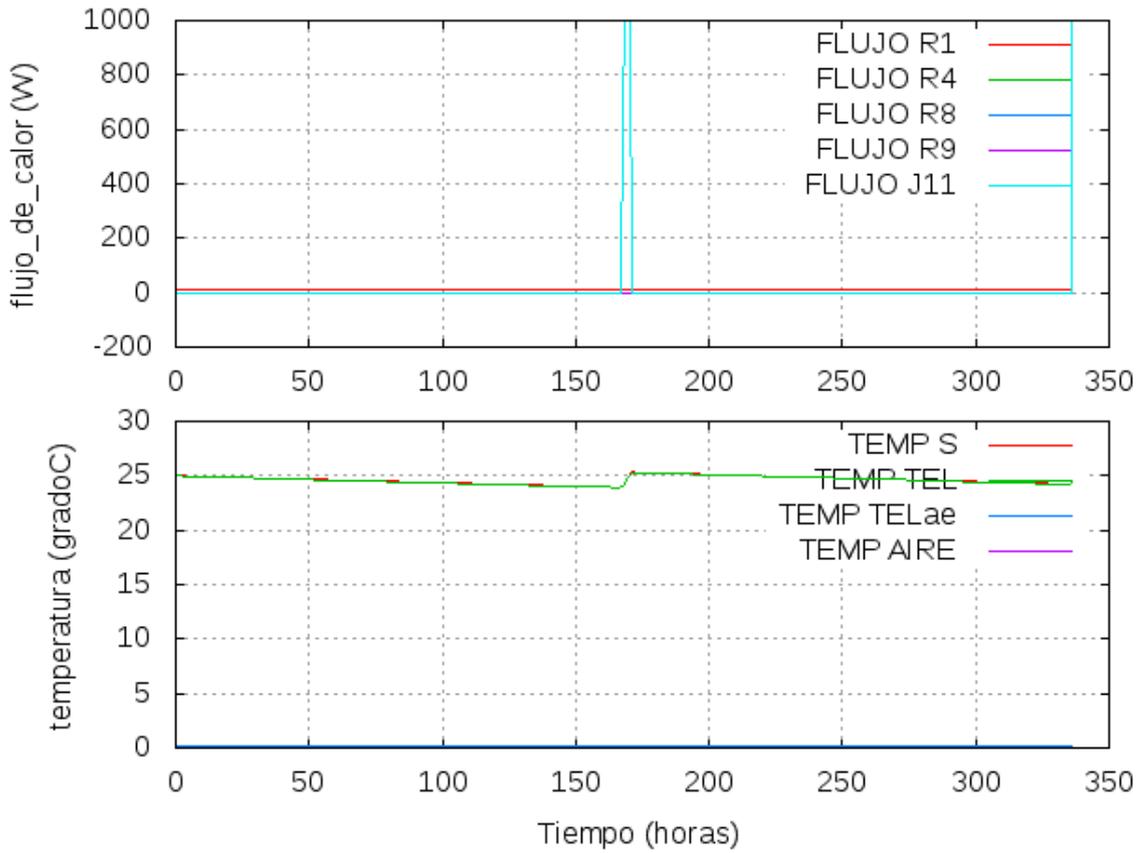


Gráfico N° 20: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 20 cm de EPS y calefaccionado. Fuente de elaboración propia.

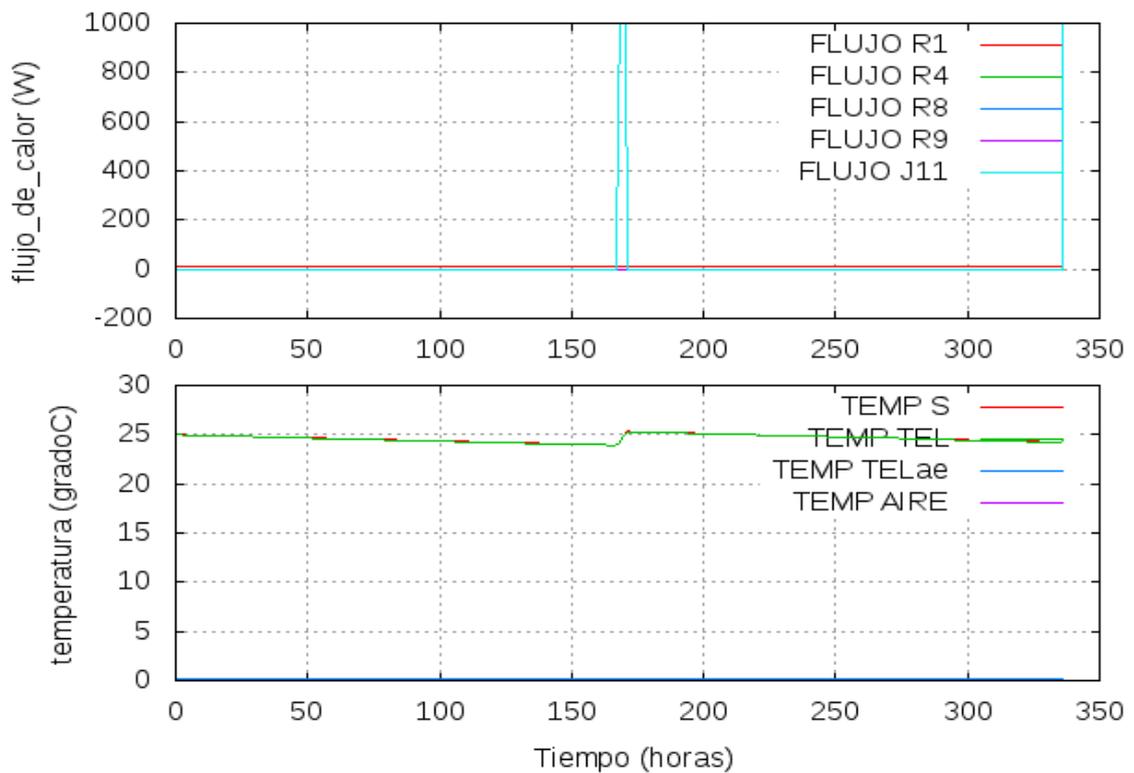


Gráfico N° 21: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor con 25 cm de EPS y calefaccionado. Fuente de elaboración propia.

ANEXO XIII: RESULTADOS DE SIMULACIONES CONDICIONES MEDIA DE INVIERNO Y VERANO BIODIGESTOR SIN AISLAMIENTO

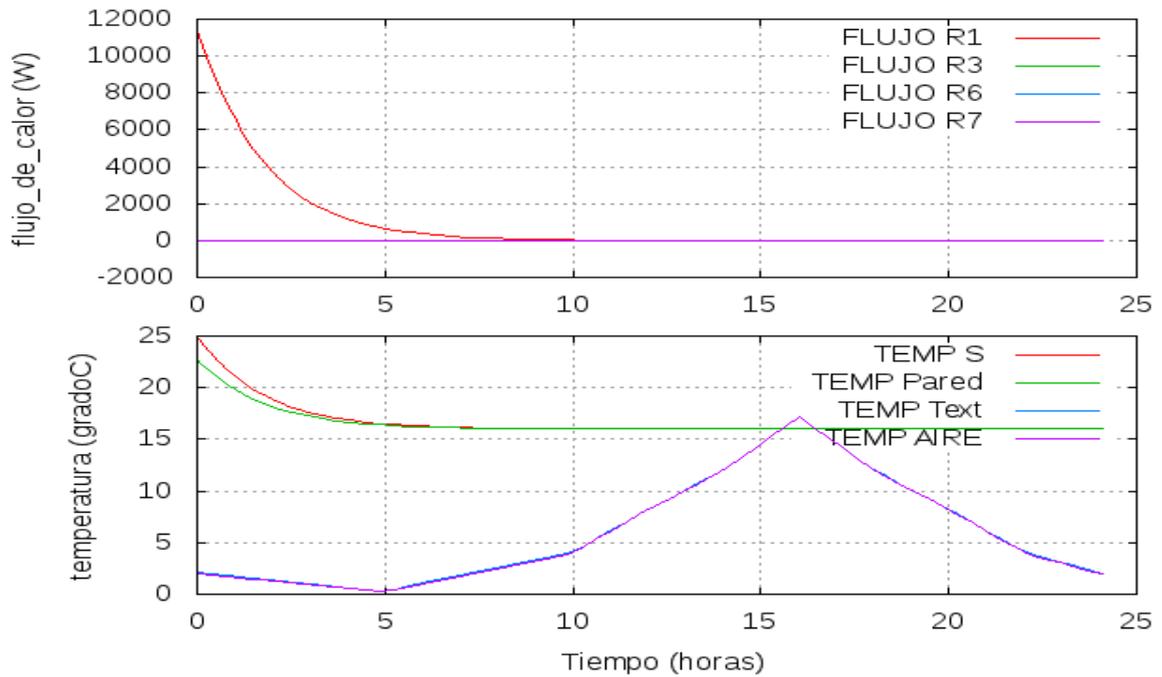


Gráfico N° 22: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor sin aislamiento en condiciones de invierno. Fuente de elaboración propia.

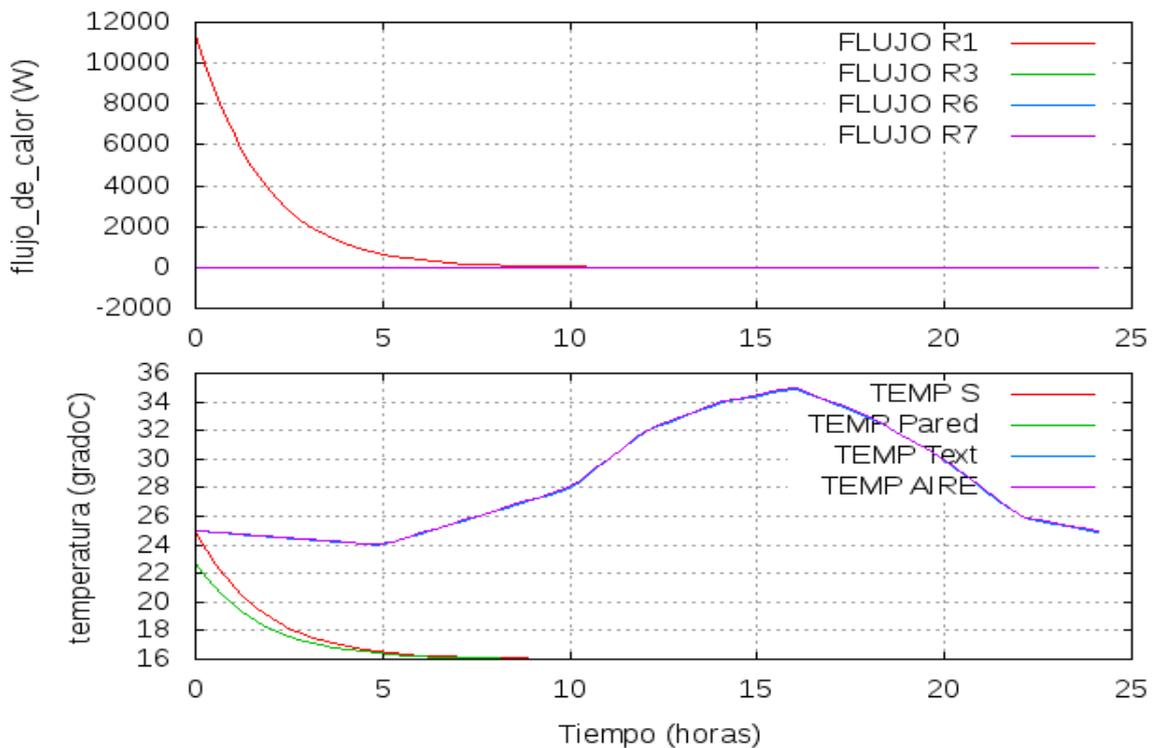


Gráfico N° 23: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor sin aislamiento en condiciones de verano. Fuente de elaboración propia.

ANEXO XIV: RESULTADOS DE SIMULACIONES CONDICIONES EXTREMAS DE INVIERNO Y VERANO BIODIGESTOR AISLADO

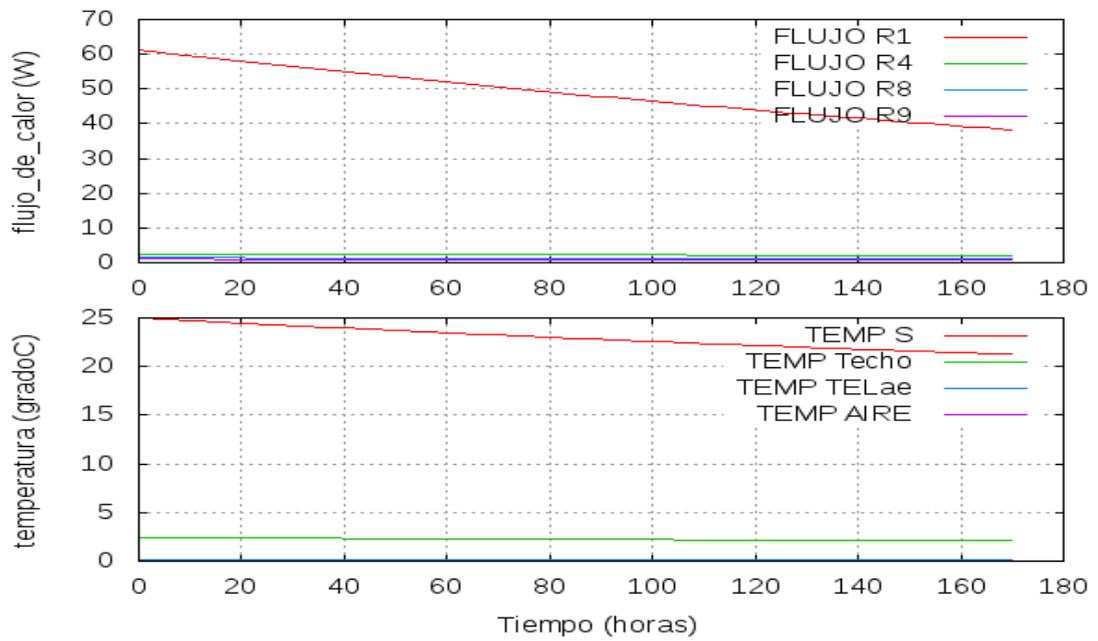


Gráfico N° 24: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor aislado con 5 cm de EPS en condiciones extremas de invierno. Fuente de elaboración propia.

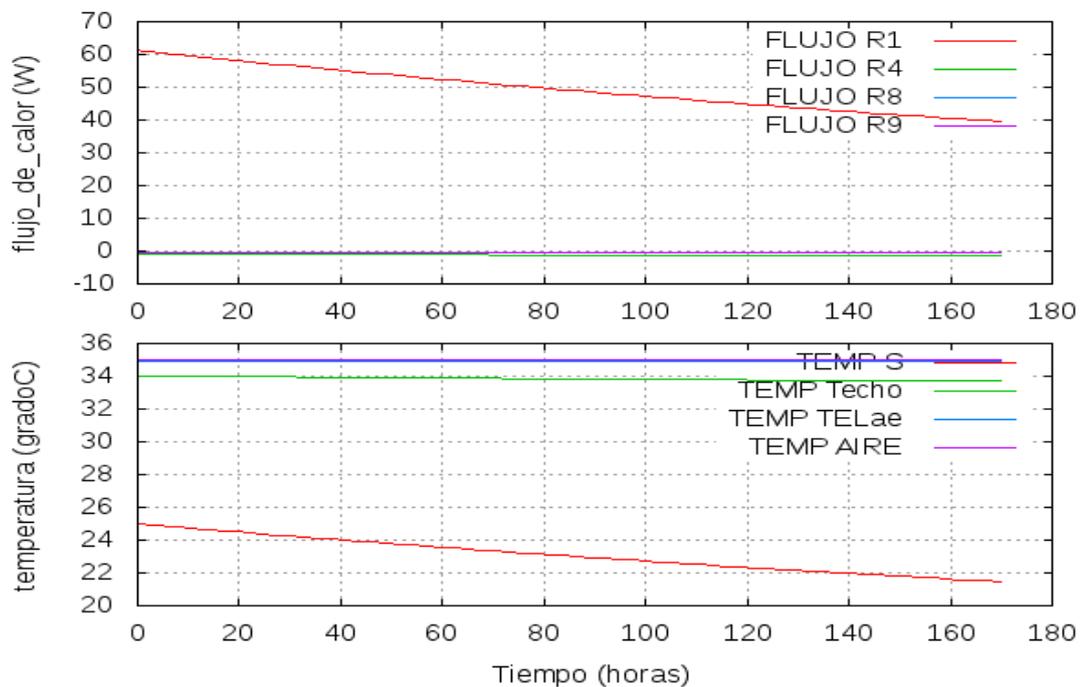


Gráfico N° 25: Simulación del comportamiento térmico y flujo de calor (W) del biodigestor aislado con 5 cm de EPS en condiciones extremas de verano. Fuente de elaboración propia.

ANEXO XV. COSTOS DE LOS DIFERENTES ESPESORES DE EPS

The screenshot shows the Easy.com.ar website interface. At the top, there is a search bar with the text "¡Hola! ¿Qué estás buscando?". Below the search bar, there are navigation links: "Categorías", "Ingresá tu ubicación", "Promociones", "Ideas e inspiración", "Cursos", "Mi Cuenta", "Favoritos", and a shopping cart icon. The breadcrumb trail reads: "Home > Construcción > Construcción > Aislación > Plancha 20Mm. 20Kg./M3". The product image shows a stack of white EPS panels. The product name is "Estisol Plancha 20Mm. 20Kg./M3" with SKU: 132516. The price is listed as \$790. There is a quantity selector set to 12. Two buttons are visible: "Comprar ahora" (yellow) and "Agregar al carrito" (orange). At the bottom right, there are icons for "Calculadora" and "Citas".

Figura N° 47: Imagen y precio de una (1) plancha de Telgopor de 2cm de espesor. Fuente: <https://www.easy.com.ar>, marzo del 2023. Costo de 3,67 dólares la unidad según cotización dólar oficial del BCRA el 31 de marzo del 2023 de \$215.

The screenshot shows the Mercado Libre website interface. At the top, there is a search bar with the text "Buscar productos, marcas y más...". Below the search bar, there are navigation links: "Enviar a Capital Federal", "Categorías", "Ofertas", "Historial", "Supermercado", "Moda", "Vender", "Ayuda", "Creá tu cuenta", "Ingresá", "Mis compras", and a shopping cart icon. The breadcrumb trail reads: "Volver al listado | Construcción > Materiales de Obra > Construcción en Seco > Poliestireno Expandido > Placas". The product image shows a single white EPS panel with the "polinorte" logo. The product name is "Plancha/placa Telgopor Estándar-baja 1m² 5,5 Cm Espesor". The price is listed as \$1.082³³ en 6x \$267⁶¹. There is a link "Ver los medios de pago". The delivery location is "El Talar, Buenos Aires" with a link "Ver costos de envío". The stock status is "Stock disponible" and the quantity is "Cantidad: 1 unidad (100 disponibles)".

Figura N° 48: Imagen y precio de una (1) plancha de Telgopor de 5 cm de espesor. Fuente: Mercado Libre, marzo del 2023. Costo de 5,03 dólares la unidad según cotización dólar oficial del BCRA el 31 de marzo del 2023 de \$215.

The image shows a screenshot of a Mercado Libre product listing. The product is 'Placa Telgopor 10 Cm Espesor Densidad Estándar'. The price is listed as \$1.969⁵⁴ with a note 'en 6x \$486⁹⁷'. The product is described as 'Nuevo | +100 vendidos'. The seller is 'El Talar, Buenos Aires'. The delivery is 'Entrega a acordar con el vendedor'. The product is available in '1 unidad' (896 disponibles). The page also shows navigation options like 'Enviar a Capital Federal', 'Categorías', 'Ofertas', 'Historial', 'Supermercado', 'Moda', 'Vender', 'Ayuda', and 'Crear tu cuenta', 'Ingresar', 'Mis compras'.

Figura N° 49: Imagen y precio de una (1) plancha de Telgopor de 10 cm de espesor. Fuente: Mercado Libre, marzo del 2023. Costo de 9,15 dólares la unidad según cotización dólar oficial del BCRA el 31 de marzo del 2023 de \$215.

The image shows a screenshot of a YPF Gas product listing for a 'CILINDRO DE 45 KG. (ENTREGADO A DOMICILIO)'. The price is \$12,000.00. The product is categorized as 'Garrapas YPF Gas'. The image shows a white gas cylinder with 'YPF GAS' and 'GAS LICUADO 45 kg' printed on it. The listing includes a quantity selector set to '1' and an 'AÑADIR AL CARRITO' button.

Figura N° 50: Garrafa de GPL (45 kg) YPF. Fuente Akitom S.A. (Distribuidor oficial YPF S.A. a fecha 31 de marzo del año 2023. Costo de 55,81 dólares la unidad según cotización dólar oficial del BCRA el 31 de marzo del 2023 de \$215.