



# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO INDUSTRIAL

Título del proyecto:

ESTUDIO DE VIABILIDAD DE UN SISTEMA DE  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EMPLEANDO  
BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE EN EL MATADERO  
MUNICIPAL DE COCHABAMBA (BOLIVIA)

Alumno: Iñigo Labiano Iradiel

Tutor: Vicente Senosiáin Miquélez

Pamplona, 12 de Febrero de 2014



# Índice

Índice de figuras .....	VII
Índice de tablas.....	XI
1. Introducción .....	1
1.1 Objetivo .....	1
1.2 Justificación .....	1
1.3 Motivación.....	2
1.4 Alcance .....	3
1.5 Organigrama .....	3
2. Marco teórico .....	5
2.1 La digestión anaeróbica.....	5
2.2 El biogás y sus aplicaciones .....	7
2.3 Generación de electricidad con biogás .....	10
2.3.1 Tecnología apropiada para la generación de electricidad .....	10
2.3.2 Motores de combustión interna alternativos .....	11
2.3.3 Elección de la tecnología de generación de electricidad.....	16
3. Diagnóstico del matadero municipal de Cochabamba .....	19
3.1 Localización, clima y emplazamiento .....	19
3.1.1 Localización .....	19
3.1.2 Clima .....	21
3.1.3 Emplazamiento.....	21
3.2 Horas de funcionamiento .....	23
3.3 Descripción del proceso productivo.....	23
3.3.1 Corrales .....	24
3.3.2 Área sucia.....	25
3.3.3 Área semi-limpia.....	26
3.3.4 Área limpia .....	27
3.4 Descripción de la maquinaria existente .....	28

3.4.1 Maquinaria .....	28
3.4.2 Caldera .....	29
3.4.3 Incineradora .....	29
3.4.4 Biodigestores.....	30
3.5 Residuos generados en el matadero .....	31
3.5.1 Línea verde .....	31
3.5.2 Línea roja.....	32
3.5.3 Grasas.....	33
3.5.4 Bosta .....	33
3.5.5 Cuarto de lodos .....	33
3.5.6 Resumen.....	34
4. Análisis de la demanda.....	35
4.1 Sistema eléctrico de alimentación y distribución del matadero.....	35
4.2 Demanda eléctrica actual .....	38
4.2.1 Datos de las facturas eléctricas .....	38
4.2.2 Análisis del consumo de electricidad.....	39
4.3 Demanda eléctrica futura .....	42
4.3.1 Datos demográficos departamento de Cochabamba .....	43
4.3.2 Datos demográficos provincia de Cercado (Cochabamba) .....	44
4.3.3 Estimación de la demanda eléctrica futura.....	45
4.4 Demanda de energía térmica.....	50
4.4.1 Consumo de biogás previsto para la caldera.....	51
4.4.2 Consumo de biogás previsto para la incineradora .....	52
4.5 Conclusiones del análisis de la demanda.....	53
5. Elección del sistema de generación .....	55
5.1 Aguas residuales del matadero y biogás generado.....	55
5.2 Estimación inicial.....	57
5.3 Tipos de sistemas generadores de electricidad .....	57
5.4 Discusión de las posibles opciones.....	59

5.4.1 Sistema para cobertura de picos.....	59
5.4.2 Sistema para reducción de tarifa .....	60
5.4.3 Sistema de cogeneración.....	62
5.4.4 Resultado de la discusión.....	64
6. Dimensionamiento del sistema de generación de electricidad.....	67
6.1 Estudio de las cargas del matadero .....	67
6.1.1 Datos del contador eléctrico.....	67
6.1.2 Levantamiento de cargas.....	68
6.2 Parámetros de dimensionamiento.....	71
6.2.1 Carga instalada .....	71
6.2.2 Horas de operación .....	72
6.3 Cálculo de la potencia del grupo electrógeno .....	73
6.4 Sobredimensionamiento por altitud .....	73
6.5 Elección del grupo electrógeno .....	75
7. Caracterización del funcionamiento del grupo electrógeno .....	79
7.1 Definición del trabajo del grupo electrógeno.....	79
7.1.1 Modo de funcionamiento .....	79
7.1.2 Análisis de las cargas y tiempos de trabajo.....	81
7.2 Determinación de los parámetros de trabajo del grupo electrógeno .....	84
7.2.1 Carga de trabajo .....	84
7.2.2 Eficiencias de trabajo.....	86
7.2.3 Resultados.....	89
7.3 Cálculo de la energía eléctrica generada y del biogás consumido por el grupo electrógeno .....	90
7.4 Análisis del biogás consumido por el grupo electrógeno.....	92
7.4.1 Viabilidad del suministro de biogás.....	92
7.4.2 Balance de combustible.....	94
7.5 Análisis de la energía eléctrica generada por el grupo electrógeno.....	96
7.5.1 Balance de energía eléctrica (Modelo de demanda actual) .....	96

7.5.2	Balance de energía eléctrica (Modelo de demanda futura) .....	97
7.5.3	Conclusiones.....	98
8.	Descripción del sistema generador .....	101
8.1	Ubicación del sistema generador .....	101
8.2	Sistema de tratamiento de las aguas residuales .....	102
8.2.1	Tanque colector .....	103
8.2.2	Biodigestor .....	104
8.2.3	Almacenamiento del efluente .....	105
8.2.4	Gasómetros .....	106
8.2.5	Quemadores.....	108
8.3	Alimentación de combustible al grupo electrógeno .....	109
8.3.1	Filtro de remoción de H <sub>2</sub> S .....	111
8.3.2	Tanque de combustible.....	113
8.3.3	Tren de calibración .....	115
8.4	Elementos del grupo electrógeno .....	116
8.4.1	Líneas de inyección y de retorno .....	117
8.4.2	Sistema de escape .....	117
8.4.3	Cimentación .....	119
8.4.4	Ventilación.....	121
8.4.5	Reducción de ruido .....	122
8.5	Sistema eléctrico .....	123
8.5.1	Interruptor de transferencia .....	123
8.5.2	Interruptor de circuito .....	124
8.5.3	Dispositivos de protección .....	125
8.6	Esquema final.....	125
9.	Análisis económico.....	127
9.1	Contexto económico de la generación de electricidad con biogás.....	127
9.2	Determinación de la inversión inicial .....	128
9.3	Determinación del ahorro anual .....	130

9.4 Rentabilidad económica del proyecto.....	132
10. Conclusiones.....	135
Bibliografía .....	139
Anexos.....	141
Anexo I - Consumo actual de las fuentes energéticas en Bolivia .....	141
I.1 Energía primaria y secundaria.....	141
I.2 Consumo de energía por sectores.....	144
I.3 Diagrama de flujo .....	146
Anexo II - Información demográfica .....	149
II.1 Datos demográficos Departamento de Cochabamba .....	149
II.2 Datos demográficos provincia de Cercado .....	152
II.3 Datos demográficos provincias del Departamento de Cochabamba .....	155
Anexo III - Análisis de la demanda de energía eléctrica.....	157
III.1 Correlación lineal estadística .....	157
III.2 Correlación entre faeneo y consumo .....	159
III.3 Estimación de la demanda futura .....	162
Anexo IV - Análisis de la demanda de energía térmica .....	167
IV.1 Poder calorífico de distintos combustibles.....	167
IV.2 Modelización del biogás del matadero .....	168
IV.3 Cálculo de la demanda de biogás de la caldera del matadero .....	170
IV.4 Cálculo de la demanda de biogás de la incineradora del matadero .....	172
Anexo V - Dimensionamiento del sistema generador .....	175
V.1 Seguimiento del contador eléctrico del matadero .....	175
V.2 Levantamiento de cargas del matadero.....	176
V.3 - Modelo de demanda eléctrica futura .....	179
V.4 – Variación de la presión atmosférica con la altitud.....	181
V.5 - Calculo del ratio de variación de densidad $\xi(z)$ .....	182
V.6 – Catálogo grupos electrógenos AQL .....	184
Anexo VI - Caracterización y descripción del sistema .....	189

VI.1 Rangos de potencia de un grupo electrógeno .....	189
VI.2 - Revisión del caso de la Universidad EARTH en Costa Rica.....	191
VI.3 Estudio de la disponibilidad de biogás para la alimentación del motor .....	194
VI.4 Cálculo del equipo necesario para el consumo de excedentes .....	196
VI.5 Estimación del volumen del biodigestor del matadero.....	199



# Índice de figuras

Figura 1: Países con alto índice de zonas sin acceso a la electricidad. Fuente: Guascor Power .....	2
Figura 2: Etapas de la digestión anaeróbica.....	6
Figura 3: Biodigestor de 1000 m <sup>3</sup> instalado en Santa Cruz (Bolivia). Fuente: J. Martí Herrero	8
Figura 4: Aplicaciones del biogás.....	9
Figura 5: Motor de cuatro tiempos. Fuente: aprendemostecnologia.org .....	12
Figura 6: Fases de un motor de cuatro tiempos. Fuente: Wikipedia.....	13
Figura 7: Grupo electrógeno a biogás. Fuente: AQL Engineering.....	16
Figura 8: Mapa satelital de Bolivia. Fuente: SNV, Estudio de factibilidad para un programa nacional de biogás doméstico en Bolivia. ....	20
Figura 9: Provincia de Cercado (Departamento de Cochabamba). Fuente: Google Maps ....	21
Figura 10: Emplazamiento del matadero municipal de Cochabamba. Fuente: Google Maps .....	22
Figura 11: Esquema del proceso productivo del matadero .....	24
Figura 12: Corrales del matadero .....	24
Figura 13: Área limpia del matadero .....	27
Figura 14: Caldera del matadero municipal de Cochabamba .....	29
Figura 15: Incineradora del matadero municipal de Cochabamba .....	30
Figura 16: Biodigestores del matadero municipal de Cochabamba .....	31
Figura 17: Línea verde del matadero municipal de Cochabamba .....	32
Figura 18: Línea roja del matadero municipal de Cochabamba.....	32
Figura 19: Recogida de la bosta en el matadero municipal de Cochabamba .....	33
Figura 20: Cuarto de lodos del matadero municipal de Cochabamba.....	34
Figura 21: Logotipo de ELFEC S.A.....	35
Figura 22: Transformador de 200 kVA del matadero municipal de Cochabamba .....	38
Figura 23: Consumos de electricidad años 2010, 2011 y 2012 .....	40
Figura 24: Demanda de electricidad año 2012.....	41
Figura 25: Crecimiento poblacional del Departamento de Cochabamba.....	43
Figura 26: Crecimiento poblacional de la provincia de Cercado (Departamento de Cochabamba).....	45
Figura 27: Linealidad entre reses faenadas y energía eléctrica consumida.....	47
Figura 28: Demanda futura para los tres criterios considerados .....	49

Figura 29: Caldera pirotubular de baja temperatura. Fuente: Guía básica de calderas eficientes. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. ....	51
Figura 30: Esquema indicativo del biogás consumido por los procesos térmicos.....	53
Figura 31: Usos del biogás producido .....	56
Figura 32: Sistema típico de cogeneración con motor de combustión interna alternativo...63	
Figura 33: Diagrama Sankey de un motor a gas natural .....	64
Figura 34: Modelo de demanda eléctrica actual del matadero municipal de Cochabamba..69	
Figura 35: Modelo de demanda eléctrica futura del matadero municipal de Cochabamba .70	
Figura 36: Detalle de las especificaciones del grupo electrógeno elegido. Fuente: AQL Engineering.....	80
Figura 37: Cargas del matadero municipal de Cochabamba (Franja horaria 7:00 - 19:00)....	82
Figura 38: Cargas agrupadas frente al rango de potencia del generador .....	83
Figura 39: Cargas de faeneo y post-faeneo frente a rango de potencia del generador .....	85
Figura 40: Definición de eficiencia eléctrica .....	87
Figura 41: Transformación de la energía química del biogás .....	87
Figura 42: Conclusiones del balance de combustible .....	95
Figura 43: Grupo electrógeno a biogás instalado en una ubicación exterior. Fuente: AQL Engineering.....	102
Figura 44: Sistema de tratamiento de aguas residuales .....	103
Figura 45: Deposición de sólidos por gravedad en el cuarto de lodos.....	103
Figura 46: Construcción de un biodigestor de 1000m <sup>3</sup> . Fuente: Construcción de un biodigestor de laguna cubierta con recorrido eficiente, J.Martí Herrero .....	104
Figura 47: Laguna de almacenamiento de biol del matadero municipal de Cochabamba ..	106
Figura 48: Gasómetro para almacenamiento de biogás. Fuente: Ecomembrane Environmental Technology.....	107
Figura 49: Operarios del matadero municipal de Cochabamba haciendo funcionar el quemador. Fuente: Rada & Asociados.....	108
Figura 50: Esquema de quemador instalado en el matadero municipal de Cochabamba...109	
Figura 51: Esquema del sistema de alimentación de combustible .....	110
Figura 52: Filtro de remoción de H <sub>2</sub> S. Fuente: VIOGAZ S.A. ....	113
Figura 53: Ejemplo de depósitos de biogás fabricados en distintos materiales. Fuente: AQL engineering.....	114
Figura 54: Tren de calibración. Fuente: AQL Engineering .....	115
Figura 55: Grupo electrógeno a biogás. Fuente: AQL Engineering .....	116
Figura 56: Líneas de inyección y de retorno de un grupo electrógeno.....	117

Figura 57: Sistema de escape típico. Fuente: Manual de aplicación de Cummins Power Generation .....	118
Figura 58: Sistema de escape para ubicación exterior .....	119
Figura 59: Cimentación de un grupo electrógeno. Fuente: Manual de aplicación de Cummins Power Generation.....	120
Figura 60: Medidas de la cimentación requerida para grupo electrógeno.....	121
Figura 61: Calor emitido por el generador al exterior. Fuente: Manual de aplicación de Cummins Power Generation .....	122
Figura 62: Generador con cubierta atenuadora de sonido. Fuente: Aqualimpia Engineering .....	122
Figura 63: Esquema del sistema eléctrico.....	123
Figura 64: Esquema de funcionamiento del interruptor de transferencia .....	124
Figura 65: Esquema final del sistema.....	126
Figura 66: Estructura de la producción de energía primaria en 2012. Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia.....	141
Figura 67: Estructura del consumo final de energía por fuentes 2012. Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia.....	143
Figura 68: Estructura de consumo final de energía por sector 2012. Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia.....	144
Figura 69: Diagrama de flujo de la energía en Bolivia. Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia .....	147
Figura 70: Diagramas de dispersión para distintos casos de correlación .....	159
Figura 71: Diagrama de dispersión consumo-faeneo .....	160
Figura 72: Diagrama de dispersión consumo-faeneo (Filtrado) .....	161
Figura 73: Modelo de demanda eléctrica actual .....	178
Figura 74: Conclusiones del levantamiento de cargas.....	179
Figura 75: Modelo de demanda eléctrica futura.....	180
Figura 76: Variación de la presión atmosférica con la altitud .....	181
Figura 77: Variación del ratio de densidad con la altitud .....	183
Figura 78: Rango de potencia standby. Fuente: Manual de Aplicación Cummins Power Generation .....	189
Figura 79: Rango de potencia primaria con tiempo de operación ilimitado. Fuente: Manual de aplicación Cummins Power Generation .....	190
Figura 80: Rango de potencia continua. Fuente: Manual de aplicación Cummins Power Generation .....	191

Figura 81: Esquema del sistema de generación de electricidad implantado en Costa Rica.

Fuente: Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda .....192

Figura 82: Motor de encendido provocado a gas natural modificado para operar con biogás.

Fuente: Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda .....193

# Índice de tablas

Tabla 1: Composición típica del biogás generado con excrementos animales. Fuente: House, 1978 .....	7
Tabla 2: Equivalencias energéticas aproximadas del biogás. Fuente: J.Martí Herrero, 2008. Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación .....	9
Tabla 3: Comparación de tecnologías para generación de electricidad con biogás. Fuente: Review of Combined Heat and Power Technologies .....	10
Tabla 4: Parámetros climáticos promedio de Cochabamba. Fuente: www.weatherbase.com .....	21
Tabla 5: Maquinaria planta interior. Fuente: Rada & Asociados.....	28
Tabla 6: Maquinaria planta exterior. Fuente: Rada & Asociados.....	28
Tabla 7: Residuos generados en el matadero municipal de Cochabamba .....	34
Tabla 8: Cargos aplicados en la tarificación de la electricidad. Fuente: ELFEC S.A.....	37
Tabla 9: Datos facturas eléctricas 2010. Fuente: Rada & Asociados .....	38
Tabla 10: Datos facturas eléctricas 2011. Fuente: Rada & Asociados .....	39
Tabla 11: Datos facturas eléctricas 2012. Fuente: Rada & Asociados .....	39
Tabla 12: Resumen facturas eléctricas año 2012 .....	42
Tabla 13: Población departamento de Cochabamba (2005-2012). Fuente: Instituto Nacional de Estadística de Bolivia.....	43
Tabla 14: Aumento poblacional Departamento de Cochabamba (2005-2012) .....	44
Tabla 15: Población provincia de Cercado (2000-2011). Fuente: Instituto Nacional de Estadística de Bolivia.....	44
Tabla 16: Aumento poblacional provincia de Cercado (2000-2011) .....	45
Tabla 17: Faeneo y consumo en el matadero municipal de Cochabamba (2012-2013). Fuente: Rada & Asociados.....	46
Tabla 18: kWh por res faenada en los meses de 2012 y principios de 2013.....	47
Tabla 19: Estimaciones de demanda máxima futura [kWh/mes] .....	48
Tabla 20: Placa de especificaciones de la caldera del matadero municipal de Cochabamba	52
Tabla 21: Conclusiones del análisis de la demanda .....	53
Tabla 22: Residuos generados por res en el matadero municipal de Cochabamba. Fuente: Rada & Asociados. ....	55
Tabla 23: Potencial de producción de biogás del matadero municipal de Cochabamba .....	56
Tabla 24: Usos del biogás producido en el matadero municipal de Cochabamba.....	56
Tabla 25: Descripción de los distintos sistemas de generación de electricidad.....	58

Tabla 26: Consumos determinados a partir de medidas al contador eléctrico.....	68
Tabla 27: Especificaciones del grupo electrógeno elegido.....	77
Tabla 28: Tipos de sistema y sus rangos de potencia recomendados. Fuente: Manual de Aplicación para Conjuntos Generadores enfriados con Líquidom, Cummins Power Generation.....	81
Tabla 29: Rango de potencia del grupo electrógeno seleccionado .....	81
Tabla 30: Parámetros de trabajo del grupo electrógeno .....	89
Tabla 31: Cálculo de electricidad generada y biogás consumido (Faeneo).....	91
Tabla 32: Cálculo de electricidad generada y biogás consumido (Post-Faeneo).....	91
Tabla 33: Resultados de la caracterización.....	92
Tabla 34: Perfil de producción de biogás por franjas horarias. Fuente: Telma Flores.....	93
Tabla 35: Biogás producido por franjas horarias .....	94
Tabla 36: Balance de combustible .....	94
Tabla 37: Balance de energía eléctrica - Modelo de demanda actual .....	97
Tabla 38: Electricidad generada (Faeneo y Post-Faeneo) .....	97
Tabla 39: Balance de energía eléctrica - Modelo de demanda futura.....	98
Tabla 40: Componentes encargados de la alimentación del grupo electrógeno .....	110
Tabla 41: Características físicas y químicas del sulfuro de hidrógeno. Fuente: OSHA, 2002 .....	111
Tabla 42: Usos del biogás y requerimientos máximos de H <sub>2</sub> S. Fuente: Revista oficial nº53 de la escuela centroamericana de ganadería.....	112
Tabla 43: Determinación del volumen del tanque de almacenamiento.....	114
Tabla 44: Componentes que conforman el sistema eléctrico .....	123
Tabla 45: Precio de los accesorios del grupo electrógeno .....	129
Tabla 46: Determinación de la inversión inicial.....	130
Tabla 47: Determinación de los valores promedio empleando los datos de las facturas eléctricas .....	131
Tabla 48: Producción de Energía Primaria (en kbep). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia.....	141
Tabla 49: Exportación de energía primaria (en kbep). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia.....	142
Tabla 50: Importación de energía secundaria (en kbep). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia .....	142
Tabla 51: Centros de transformación de energía primaria (en kbep). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia .....	142

Tabla 52: Consumo final de energía por fuentes (en kbep). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia.....	143
Tabla 53: Consumo final de energía por sectores (en kbep). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia.....	144
Tabla 54: Consumo final de energía sector transporte (en kbep). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia.....	145
Tabla 55: Consumo final de energía sector industrial (en kbep). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia.....	145
Tabla 56: Consumo final de energía sector residencial (en kbep). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia.....	145
Tabla 57: Consumo final de energía sector comercial (en kbep). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia.....	146
Tabla 58: Consumo final de energía sector agrop., pesca y minería (en kbep). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia .....	146
Tabla 59: Población total departamento de Cochabamba según edades simples. Periodo 2005-2011. Fuente: Instituto Nacional de Estadística de Bolivia .....	151
Tabla 60: Población total provincia cercado (Departamento de Cochabamba) según edades simples. Periodo 2000-2010. Fuente: Instituto Nacional de Estadística de Bolivia.....	154
Tabla 61: Población total según provincia y sección de provincia. Periodo 2009-2011. Fuente: Instituto Nacional de Estadística de Bolivia.....	156
Tabla 62: Muestras de faeneo y consumo .....	160
Tabla 63: Estimación demanda futura (Criterio optimista).....	163
Tabla 64: Estimación demanda futura (Criterio realista).....	164
Tabla 65: Estimación demanda futura (Criterio pesimista).....	165
Tabla 66: Poderes caloríficos de diferentes sustancias. Fuente: Moran & Shapiro, 2004...	167
Tabla 67: Resultados pruebas primer biodigestor.....	168
Tabla 68: Resultados pruebas segundo biodigestor .....	168
Tabla 69: Resultados pruebas tercer biodigestor .....	169
Tabla 70: Poder calorífico inferior del metano.....	169
Tabla 71: Placa de especificaciones de la caldera del matadero municipal de Cochabamba .....	170
Tabla 72: Resumen de los datos obtenidos para la caldera.....	172
Tabla 73: Determinación del consumo de la incineradora (PCI = 3000 kcal/kg) .....	173
Tabla 74: Determinación del consumo de la incineradora (PCI = 4000 kcal/kg) .....	173
Tabla 75: Medidas de potencia activa .....	175
Tabla 76: Consumos diarios en base a las medidas al contador .....	175

Tabla 77: Cargas eléctricas planta interior .....	177
Tabla 78: Cargas eléctricas planta exterior .....	177
Tabla 79: Cargas eléctricas otros servicios .....	177
Tabla 80: Levantamiento de cargas .....	178
Tabla 81: Conclusiones del modelo de demanda eléctrica futura.....	180
Tabla 82: Estudio del suministro al motor.....	195
Tabla 83: Determinación de la potencia del equipo para consumo de excedentes .....	196
Tabla 84: Especificaciones grupo electrógeno para el consumo de excedentes.....	198



# 1. Introducción

## 1.1 Objetivo

El presente proyecto tiene como finalidad estudiar la viabilidad de implementar un sistema de generación de energía eléctrica destinado a cubrir las demandas energéticas del matadero municipal de Cochabamba y que emplee el biogás generado por el propio matadero como combustible. Para ello se valorarán distintas alternativas tecnológicas y se decidirá cuál es la más adecuada.

Se comenzará estudiando el matadero y las demandas que tiene el mismo con el fin de conocer el biogás disponible para cada uno de los procesos. Se distinguirá entre dos fracciones de biogás:

- Biogás destinado a procesos térmicos
- Biogás disponible para generar electricidad

A partir de esta información se dimensionará el sistema de generación de energía eléctrica eligiendo la alternativa que se prevea más viable técnica y económicamente para el caso que se estudia. Se describirá el sistema, así como los elementos que lo conforman y se valorará económicamente la viabilidad de su implementación.

## 1.2 Justificación

El contar con acceso a la electricidad es un factor fundamental para la erradicación de la pobreza ya que permite tener iluminación, mejorar las comunicaciones, desarrollar el comercio y mejorar la calidad de la educación y la salud pública. A pesar de su importancia, en la actualidad hay cerca de 2000 millones de personas en el mundo que viven sin acceso a la electricidad<sup>1</sup>. Es por ello que aplicaciones que permitan la generación de electricidad de forma autónoma y en el propio lugar de consumo deben ser tenidas en cuenta para el desarrollo social y económico del planeta.

La gran capacidad generadora del matadero municipal de Cochabamba lo convierte en un caso de especial interés, más aun en un país como Bolivia, en donde el sistema eléctrico se encuentra al límite de su capacidad. Esta limitación lleva en ocasiones a que la demanda y la oferta de electricidad se igualen, siendo la medida para evitar la sobrecarga la restricción del uso de electricidad a los consumidores. Esto hace que la aparición de

---

<sup>1</sup> Datos del Banco Mundial, organismo de las Naciones Unidas que se define como una fuente de asistencia financiera y técnica para los países en desarrollo.

pequeños generadores de energía eléctrica, ya sea para autoconsumo como para venta de excedentes, deba ser tenida en cuenta como una alternativa para mejorar el sistema eléctrico boliviano. Además, el hecho de emplear un combustible como el biogás, plantea una nueva opción en el empleo de energías alternativas que puede ser de gran importancia en países en vías de desarrollo.

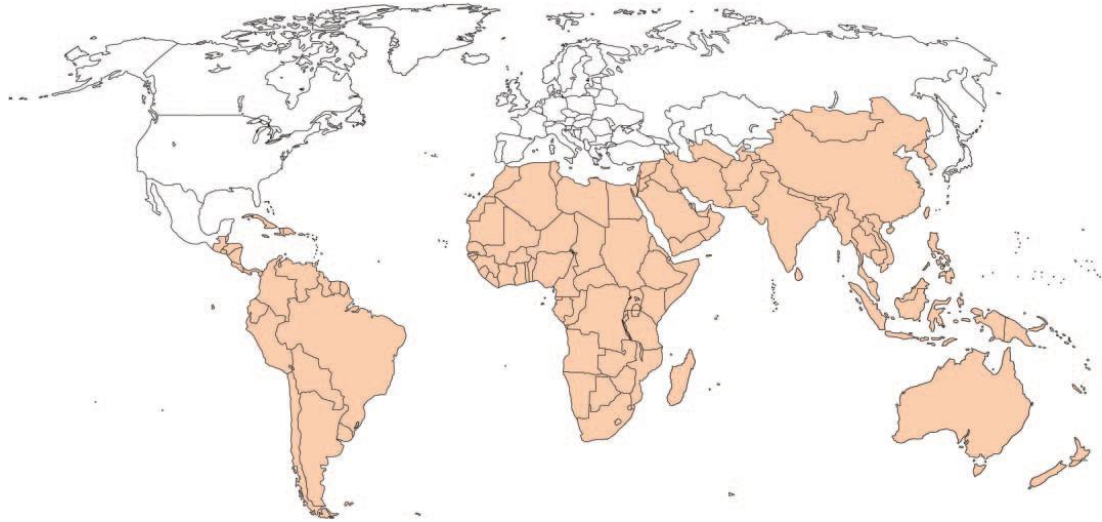


Figura 1: Países con alto índice de zonas sin acceso a la electricidad. Fuente: Guascor Power

### 1.3 Motivación

El Matadero Municipal de Cochabamba es una empresa que abastece con carne de res a aproximadamente el 80% de los mercados de la ciudad. Esta empresa decide estudiar la viabilidad de implementar un sistema de generación eléctrica empleando el biogás producido a partir de sus aguas residuales con el fin de satisfacer su demanda de energía eléctrica. También desea estudiar la posibilidad de cubrir las demandas térmicas de los procesos empleando el mismo biogás o la electricidad generada por el mismo. Además, el hecho de que el combustible empleado por el sistema sea el biogás generado por el propio matadero a partir de sus residuos, dota a este proyecto de un interés particular debido a su contribución al desarrollo sostenible de Bolivia.

La decisión de estudiar la posibilidad de implementar un sistema de generación de energía eléctrica ha sido motivada principalmente por las siguientes razones:

- Disminución de los costes energéticos que podrían hacer que la empresa sea más competitiva en su sector.
- Dotar a la fábrica de un sistema flexible, capaz de atender futuras ampliaciones de demanda energética de forma económica y con fácil explotación.

- Contribuir a maximizar el potencial de autogeneración del país, con la consiguiente reducción en el consumo global de energía primaria.

## 1.4 Alcance

El proyecto abarca:

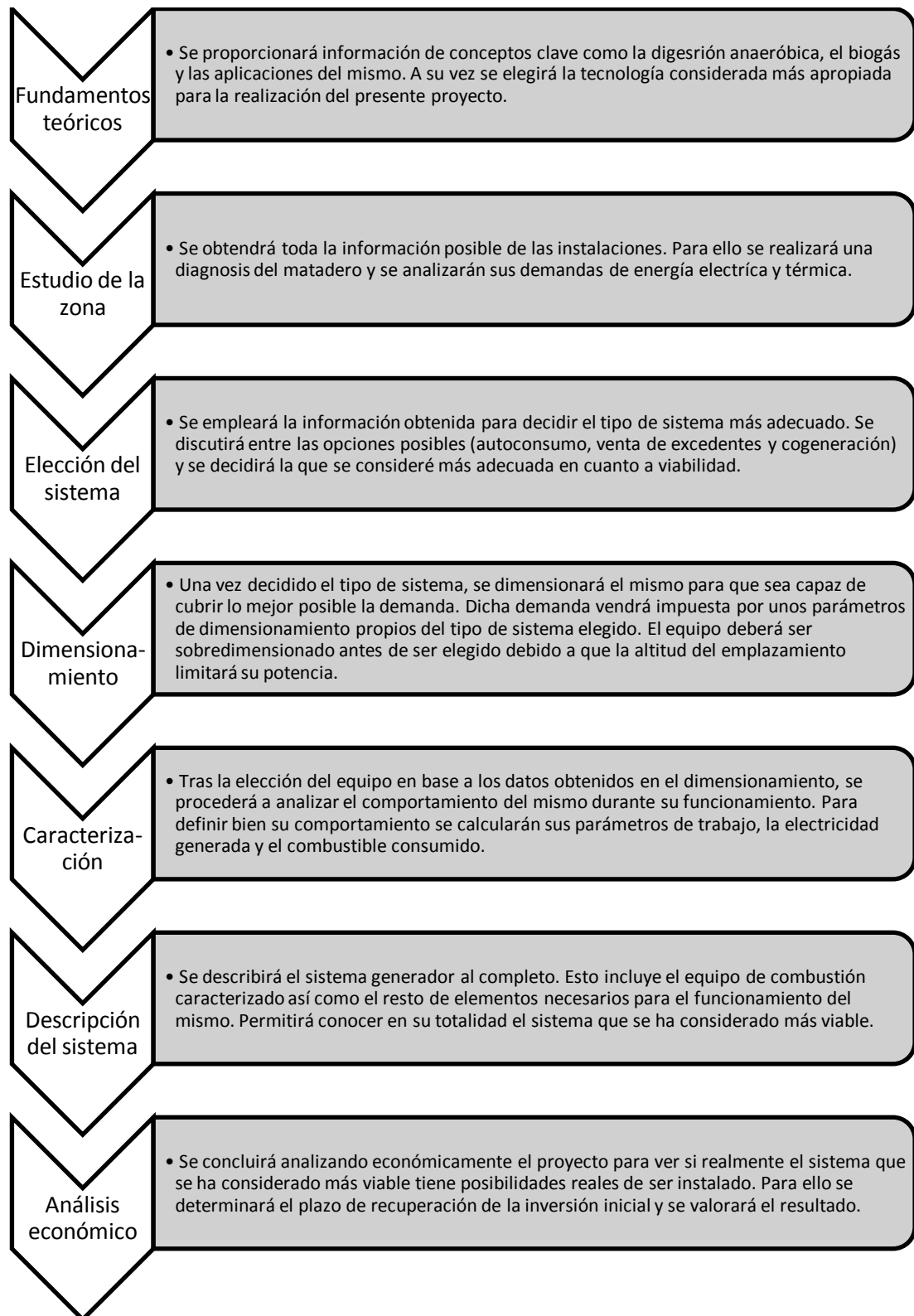
- Revisión de las experiencias disponibles acerca de la generación de energía eléctrica empleando biogás como combustible.
- Análisis de la zona en la que se ubica el proyecto.
- Dimensionamiento del sistema de generación de electricidad requerido por las instalaciones.
- Caracterización del funcionamiento del equipo que conforma el sistema.
- Descripción del sistema y de los elementos que lo conforman.
- Justificación de la viabilidad económica del sistema.

No son objeto de este proyecto:

- Dimensionamiento y diseño del sistema de tratamiento de las aguas residuales.
- Diseño técnico del sistema de generación de electricidad elegido.
- Adaptación de caldera e incineradora para su funcionamiento con biogás.

## 1.5 Organigrama

El presente proyecto se llevará a cabo tal y como se indica en el organigrama posterior.



## 2. Marco teórico

Se incluye este marco teórico con el fin de explicar el proceso de digestión anaeróbica, la producción de biogás y las aplicaciones de dicho combustible. Se profundiza en la aplicación de mayor interés para el caso de estudio, la cual es el empleo del biogás para la generación de energía eléctrica. La información expuesta permite concluir realizando una elección de la tecnología más apropiada para el proyecto.

### 2.1 La digestión anaeróbica

La producción de gas metano a partir de desechos orgánicos es hoy en día una práctica industrial muy común en países desarrollados. Todo material orgánico degradado como los desechos bovinos, avícolas, porcinos, desechos de plantaciones y desechos de plantas procesadoras de alimentos tienen el potencial de producir metano bajo ciertas condiciones. Esto puede producirse gracias a la digestión anaeróbica.

La digestión anaeróbica de los desechos es una forma de bioconversión donde se aprovechan las cadenas de carbohidratos, lípidos y proteínas para transformarlas en metano, la unidad más simple de los hidrocarburos. Este tipo de bioconversión tiene como ventajas principales la producción de una fuente directa de energía como es el gas metano y la reducción de la masa de desechos a costa de producir un fertilizante orgánico de muy bajo costo. A diferencia de otros procesos de producción de combustibles a partir de biomasa, esta bioconversión que se lleva a cabo bajo condiciones anaeróbicas, lo cual permite conservar todos los nutrientes inorgánicos en el lodo.

Las bacterias que producen el metano durante el proceso de digestión anaeróbica son conocidas como metanogénicas. Estas bacterias pueden crecer en un amplio rango de temperatura y se desarrollan fácilmente en ambientes de pH neutro, aunque la principal condición para que se dé su existencia es la ausencia de oxígeno. A continuación se describen brevemente las etapas que componen el proceso de digestión anaeróbica<sup>2</sup>:

- I. Hidrólisis: Este término indica la conversión de compuestos orgánicos complejos e insolubles (lípidos, proteínas y carbohidratos) en otros compuestos más sencillos y solubles en agua. Esta etapa es fundamental para suministrar los compuestos orgánicos necesarios para la estabilización anaeróbica en forma que pueden ser utilizados por las bacterias responsables de las dos etapas siguientes.

---

<sup>2</sup> Middlebrooks et al, 1982

- II. Acidogénesis: Los compuestos orgánicos sencillos generados en la etapa anterior son utilizados por las bacterias encargadas de generar los ácidos. Como resultado se produce su conversión en ácidos orgánicos volátiles, alcoholes y otros subproductos importantes para etapas posteriores (amoníaco, hidrógeno y dióxido de carbono). Esta etapa la pueden llevar a cabo bacterias anaeróbicas o facultativas.
- III. Acetogénesis: Las bacterias acetogénicas son microorganismos que viven en estrecha colaboración con las metanogénicas. Estos microorganismos son capaces de transformar los ácidos grasos resultantes de la etapa anterior en los sustratos propios de la metanogénesis (acetato, dióxido de carbono e hidrógeno).
- IV. Metanogénesis: Una vez que se han formado ácidos orgánicos, dos nuevas categorías de bacterias entran en acción, unas que se encargan de convertir el acetato en metano y dióxido de carbono (acetoclásticos) y otras que se combinan el dióxido de carbono y el hidrógeno para producir metano y agua (hidrotróficos). Esta fase de la digestión anaeróbica es en la que se consigue la eliminación de la materia orgánica, ya que los productos finales no contribuyen a la DBO ni a la DQO del medio. A diferencia de lo que ocurre con la fase acidogénica, el metabolismo de estas bacterias es más lento y además, son mucho más sensibles a distintas condiciones ambientales, tales como pH y temperatura.

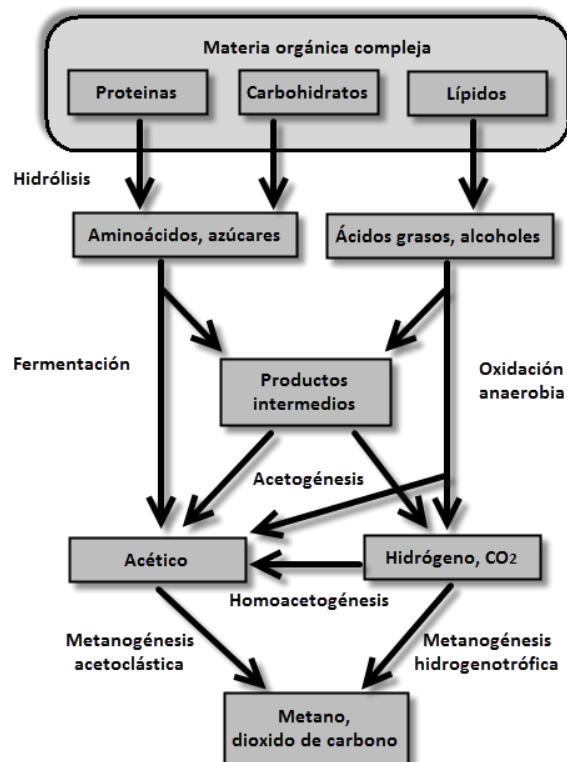


Figura 2: Etapas de la digestión anaeróbica

## 2.2 El biogás y sus aplicaciones

El biogás es simplemente una mezcla de gases en donde predominan el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Esta mezcla de gases se produce debido a la biodegradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno en un proceso que se conoce como digestión anaeróbica<sup>3</sup>. El metano, el cual se obtiene al final del proceso de digestión anaerobia, es un gas inflamable que confiere al biogás su capacidad para ser empleado como combustible.

Compuesto	Valor	Unidad de medida
Metano ( $\text{CH}_4$ )	50 - 85	% (v/v) <sup>4</sup>
Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )	15 - 50	% (v/v)
Sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ )	100 - 2000	ppm <sup>5</sup> (v/v)
Nitrógeno ( $\text{N}_2$ )	< 1 %	(v/v)
Agua ( $\text{H}_2\text{O}$ )	100	% de saturación
Hidrógeno ( $\text{H}_2$ )	< 0,01	% (v/v)

Tabla 1: Composición típica del biogás generado con excrementos animales. Fuente: House, 1978

La producción de biogás a través del mecanismo de digestión anaeróbica depende de la cantidad y de las características de la materia orgánica. En términos generales, el biogás puede ser obtenido a partir de aguas residuales orgánicas y también a partir de residuos sólidos, como por ejemplo, el estiércol, desechos de pastos o desechos urbanos (basura). Las condiciones específicas que permiten el crecimiento de bacterias anaeróbicas pueden ocurrir tanto en ambientes naturales (sedimentos de lagos, tractos gastrointestinales de animales, etc.) o ser creadas en procesos industriales y rurales por el ser humano. Estos procesos creados por el hombre se apoyan en una tecnología desarrollada y conocida como son los biodigestores.

Un biodigestor es tan solo un recinto que proporciona las condiciones idóneas para que tenga lugar el proceso de digestión anaeróbica de los desechos orgánicos. Estructuralmente se trata de un contenedor cerrado, hermético e impermeable dentro del cual se deposita la materia orgánica a fermentar. Hay muchos tipos de biodigestores dependiendo de cuál sea su función, tipo de alimentación o morfología, pero en términos generales, se trata de un sistema sencillo de implementar con materiales económicos el cual se está introduciendo en comunidades aisladas y países en vías de desarrollo.

<sup>3</sup> Véase apartado 2.1

<sup>4</sup> v/v = volumen sobre volumen

<sup>5</sup> ppm = partes por millón



Figura 3: Biodigestor de 1000 m<sup>3</sup> instalado en Santa Cruz (Bolivia). Fuente: J. Martí Herrero

Las granjas porcinas, establos lecheros y rastros son las instalaciones que cuentan con un mayor potencial para la generación de biogás. Esto se debe a que dichas instalaciones disponen de un manejo sistemático de los desechos orgánicos, los cuales generan en grandes volúmenes y que, de ser sometidos al proceso de digestión anaeróbica, pueden producir una gran cantidad de biogás. Además, dichas instalaciones cuentan con la ventaja añadida de que los residuos generados son a menudo de distinta naturaleza, posibilitando la codigestión anaeróbica.

La codigestión anaeróbica consiste en emplear una mezcla de diferentes tipos de residuos, de forma que se optimice la producción de biogás a obtener por una planta. La codigestión presenta un gran interés desde el punto de vista técnico ya que, empleando las instalaciones existentes, se puede incrementar enormemente la producción de biogás. Además, empleando diferentes tipos de residuos se disminuye la dependencia de un solo residuo que tendría la planta en caso de no emplear la codigestión. Su principal ventaja radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de cada uno de los sustratos por separado. Además de incrementar el potencial de producción de biogás, la adición de sustratos fácilmente biodegradables confiere una estabilidad adicional al sistema.

Una de las aplicaciones más extendidas del biogás producido es emplearlo para cocinar, sirviendo como sustituto de la leña y de otros gases como el butano o el propano. Su poder calorífico<sup>6</sup> es menor al de los gases de cocina convencionales debido a su menor contenido en metano. Las consecuencias de esto es que la energía liberada por el biogás durante su combustión es menor, ocasionando que se tarde más en cocer los alimentos que si se emplean gases convencionales.

<sup>6</sup> Definición de poder calorífico en Anexo IV.1



1000 litros (1m <sup>3</sup> ) de biogás equivale a:	
Madera	1,3 kg
Bosta seca	1,2 kg
Alcohol	1,1 litros
Gasolina	0,75 litros
Gas-oil	0,65 litros
Gas natural	0,76 m <sup>3</sup>
Carbón	0,7 kg
Electricidad	2,2 kW/h

Tabla 2: Equivalencias energéticas aproximadas del biogás. Fuente: J.Martí Herrero, 2008. *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación*

Cuando se produce gran cantidad de biogás, se puede emplear el mismo en calefacción e incluso para alimentar a un motor de combustión. Esto último adquiere especial interés ya que, en caso de que el motor vaya acoplado de manera correcta a un generador, permite generar electricidad. La aplicación más interesante que se le puede encontrar al biogás dentro de la generación eléctrica es la que permita generarla en los lugares de consumo consiguiendo satisfacer a los usuarios con calidad, fiabilidad y eficiencia. Este tipo de generación no requiere de los servicios de una planta generadora convencional, pudiendo ser de tipo autónomo. Además, emplea combustibles accesibles para la población rural y puede cubrir múltiples aplicaciones como alumbrado público, suministro doméstico y suministro industrial. Esto concede la opción a las grandes instalaciones ganaderas de generar su propia electricidad, la cual puede proporcionar una fuente de ingresos si se comercializa o una reducción de costes si se emplea para autoconsumo.

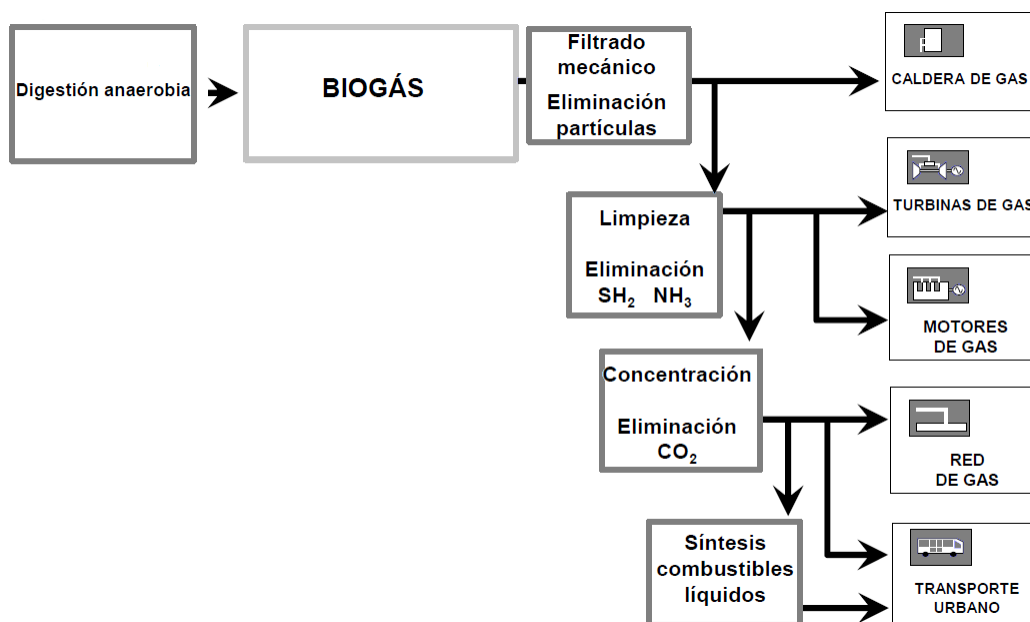


Figura 4: Aplicaciones del biogás

## 2.3 Generación de electricidad con biogás

### 2.3.1 Tecnología apropiada para la generación de electricidad

La generación de electricidad, utilizando biogás, es una posibilidad real y altamente documentada. Son muchas las alternativas posibles para generar electricidad empleando el biogás como combustible: motores de combustión interna, celdas de combustible, turbinas de gas y de vapor, etc. De entre este abanico de posibilidades habrá que escoger la tecnología que se considere más apropiada para la generación de electricidad con biogás. La siguiente tabla muestra una comparación entre las posibles tecnologías:

	MACI C.DIESEL	MACI C.OTTO	TURBINA DE VAPOR	TURBINA DE GAS		MICRO- TURBINA	PILA DE COMBUSTI BLE
				Ciclo Simple	Ciclo Combinado		
$\eta$ eléctrico (PCI)	30-50%	25-45%	30-42%	25-40%	40-60%	20-30%	40-70%
Rango P (MW)	0,01-30	0,15-5	---	3-200		0,025-0,25	0,2-2
Espacio requerido (m <sup>2</sup> /kW)	0,02	0,02-0,03	<0,01	0,002-0,06		0,014-0,14	0,06-0,4
Coste instalación (€/kWe)	780-1480	780-1480	780-950	670-860		480-1240	>2850
Coste OM (€/kWh)	0,005-0,008	0,007-0,015	0,004	0,002-0,008		0,002-0,01	0,003-0,015
Disponibilida d	90-95%	92-97%	≈100%	90-98%		90-98%	>95%
h entre puestas pto. t arranque	Anual	Anual	>50000	30000-50000		5000- 40000	10000- 40000
Presión combustible (bar)	<0,35	0,07-3	---	8,5-35		3-7	0,04-3
Combustible	Gasoil, aceites residuales	GN, biogás, propano	Todos	GN, biogás, propano, aceites destilados		GN, biogás, propano, aceites destilados	H2, GN, propano
Ruido	Moderado a alto (requiere edificio cerrado)	Moderado a alto (requiere edificio cerrado)	Moderado a alto (requiere edificio cerrado)	Alto (requiere edificio cerrado)		Moderado (requiere edificio cerrado)	Bajo (no requiere aislamiento)
NOx (kg/MWh)	1,36-15	1-12,7	0,82	0,14-1,82		0,18-1	0,009
Uso para calor recuperado	AC, vapor BP, "district heating"	AC, vapor BP, "district heating"	Vapor BP-AP, "district heating"	Calor directo, AC, vapor BP-AP, "district heating"		Calor directo, AC, vapor BP	AC, vapor BP
Temperatura aprovechabl e (°C)	82-480	150-260	---	260-595		205-345	60-370

Tabla 3: Comparación de tecnologías para generación de electricidad con biogás. Fuente: *Review of Combined Heat and Power Technologies*

Una definición muy ajustada de tecnología apropiada sería: Aquella que responde adecuadamente a las necesidades sociales y ecológicas de las personas, que es descentralizada y a pequeña escala, manejable, que emplea fuentes renovables de energía, que es de bajo coste, que fomenta el empleo, que está basada en la comunidad y en relaciones humanas no autoritarias y no jerárquicas, que libera a las personas de cargas

alienantes, permitiéndolas ser más creativas y participar en la comunidad, profundizando así la democracia. Esta extensa definición es en la mayoría de los casos imposible de cubrir, por lo que se buscará la tecnología que aúne la mayor cantidad de características implícitas en la definición.

Debido a su autonomía y compatibilidad, se considera que la tecnología apropiada para los proyectos rurales de generación de electricidad con biogás es el empleo de motores alternativos de combustión interna.

### 2.3.2 Motores de combustión interna alternativos

El motor alternativo de combustión interna es un motor que convierte la energía química contenida en un combustible en energía mecánica de rotación de un eje. La reacción explosiva de la mezcla aire-combustible en el interior de un cilindro provoca el movimiento lineal del pistón, que la biela convierte en rotación del cigüeñal. De esta manera también se asegura el movimiento alternativo del pistón, que permite la expulsión de los gases formados en la combustión y la entrada de mezcla fresca lista para explosionar.

Los motores alternativos de combustión interna están basados en una tecnología conocida y ampliamente usada. Esta tecnología se encuentra presente en máquinas tan habituales como automóviles, barcos, aviones, equipos de obras públicas, y por supuesto, en plantas de producción de energía eléctrica. Para esta última aplicación, la energía mecánica generada por el motor se emplea para mover un alternador, el cual se encarga de transformar la misma en energía eléctrica. Es por lo tanto la combinación de un motor y de un alternador lo que permite obtener energía eléctrica a partir de un combustible. Además, el motor y el alternador pueden ser adquiridos como un solo conjunto denominado grupo electrógeno.

Hay básicamente dos tipos de motores de combustión: Los motores de encendido provocado, más conocidos como motores de gas o de ciclo Otto y los motores de encendido por compresión, más conocidos como motores diesel. Ambos tipos de motores presentan esencialmente los mismos componentes: Una cámara de combustión cilíndrica que es recorrida por un pistón el cual se encuentra conectado con el eje del cigüeñal a través de una biela, de tal manera que se transforma el movimiento lineal del pistón en uno de rotación.

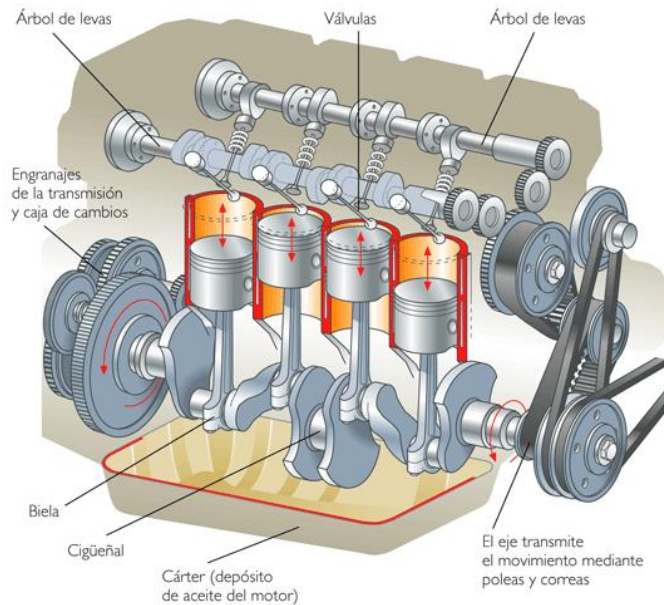


Figura 5: Motor de cuatro tiempos. Fuente: aprendemostecnologia.org

La principal diferencia entre ambos es el método de encendido. En los motores de encendido provocado este se realiza gracias a la chispa de una bujía que inicia la combustión de la mezcla de comburente (aire) y combustible después de que ésta es introducida en la cámara, mientras que en los motores de encendido por compresión se comprime en primera estancia únicamente aire a alta presión y cuando su temperatura es lo suficientemente alta es cuando se inyecta en la cámara combustible a alta presión produciéndose la combustión.

Los motores pueden ser de 2 o de 4 tiempos, siendo los de 4 tiempos los más utilizados en aplicaciones de generación de potencia. El proceso de renovación de la carga en un motor de 4 tiempos se realiza aprovechando el movimiento del pistón. En estos motores hay una serie de válvulas que comunican la cámara de combustión con las zonas de entrada y salida: válvulas de admisión y de escape. Cuando el pistón desciende se abre la válvula de admisión lo que propicia la entrada de aire o de la mezcla aire-combustible del exterior. La correa de distribución es la encargada de sincronizar el movimiento del pistón con la apertura de la válvula. Posteriormente se realiza la compresión y más tarde tiene lugar la explosión, en la que se produce un proceso de expansión o carrera de trabajo en el cual tiene lugar un intercambio de energía entre el fluido y el pistón. El ciclo se cierra con el proceso de escape, en el que se expulsan al exterior los gases residuales generados en la combustión a través de la válvula de escape.

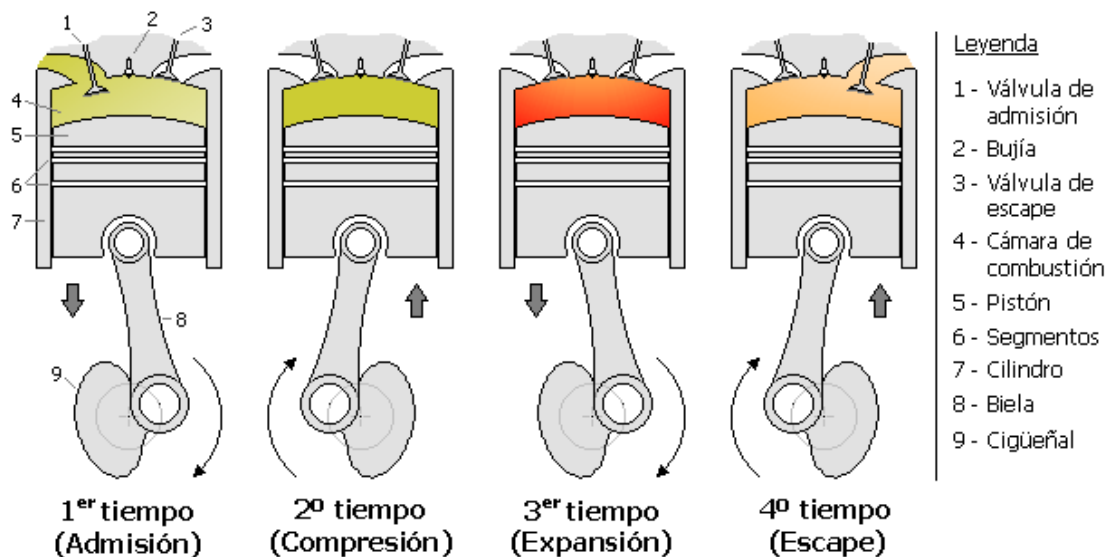


Figura 6: Fases de un motor de cuatro tiempos. Fuente: Wikipedia

El biogás puede ser empleado como combustible en motores de combustión interna con el cometido de generar energía eléctrica. Dichos equipos pueden haber sido diseñados para funcionar con biogás como combustible o pueden estar pensados para funcionar con un combustible diferente. Este último grupo englobaría a los motores a gas, gasolina o diesel, los cuales pueden ser modificados para funcionar con biogás. En cuanto a los equipos diseñados para funcionar específicamente con biogás, se puede encontrar en el mercado grupos electrógenos con motor integrado a biogás. A continuación se exponen las características de los equipos de combustión mencionados:

### Motores a gasolina

Los motores de combustión a gasolina pueden funcionar con biogás realizándoles una simple adaptación, que consiste en colocar entre el filtro del aire y el carburador una "T" por donde se suministra el biogás al sistema. Al ser alimentado con biogás directamente al colector de admisión, el motor no permite una regulación automática de la mezcla y la carga, por lo que el ajuste del motor se debe realizar de forma manual desde la válvula de control del biogás, colocada en la línea de admisión. Es por ello que se recomienda que las cargas aplicadas sean constantes, para evitar los problemas de regulación del motor y por tanto una ineficiente calidad de la energía suministrada por el generador. Para el caso de cargas variables, el flujo de gas hacia el motor se debe regular con un sistema de control especialmente diseñado, que garantice que el flujo del gas que se inyecte en el motor pueda responder a las diferentes demandas de potencia debido a las variaciones de carga eléctrica, provocada por el constante entrar y salir de cargas.

### **Motores a diesel**

Los motores de combustión a diesel han sido históricamente los más populares para las aplicaciones de generación tanto de pequeña como de gran potencia. Debido a su mayor relación de compresión presentan una mayor eficiencia que los motores de encendido provocado. Sin embargo en la actualidad se encuentran en claro retroceso debido a su alto índice de emisiones contaminantes y viéndose superados por los motores de encendido provocado con gas natural.

Los motores a diesel pueden operar con una sustitución del diesel por biogás de hasta un 70% con un consumo de diesel del 30% restante. Al consumir los dos tipos de combustible al mismo tiempo el motor no sufre ninguna alteración. En estos motores la mezcla de diesel y biogás se realiza directamente en la cámara de combustión del motor. Cuando el motor recibe el biogás por la entrada de aire, este se acelera, por lo que el gobernador de la bomba de inyección reduce la cantidad de diesel suministrado a la cámara de combustión, logrando una estabilidad en la aceleración y potencia del motor. Estos motores soportan las variaciones de carga sin tener que operar la válvula de regulación del biogás, permitiendo operar en un rango más amplio de carga. Para los arranques del motor se debe alimentar únicamente con diesel, una vez arrancado el mismo se realiza la transferencia de biogás gradualmente hasta alcanzar el 70%. No es recomendable la sustitución mayor a un 70% de biogás por diesel porque puede dañar el motor.

### **Motores a gas**

En los motores de combustión a gas el combustible utilizado es generalmente gas natural. El gas natural es un hidrocarburo compuesto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) y su poder calorífico es muy parecido al de los combustibles derivados del petróleo. Para que un motor pueda funcionar con gas natural debe de ser de explosión con encendido por chispa (Ciclo Otto). El proceso de combustión es muy similar al de un motor de gasolina y tan solo se diferencia del mismo en la tecnología de admisión del combustible. El aire aspirado por el motor se mezcla en el colector de admisión con el gas natural por efecto venturi o por inyección. La mezcla es introducida en el cilindro por la válvula de admisión para posteriormente ser comprimida y explosionada tras saltar la chispa en la bujía.

Las modificaciones que se deben realizar al motor para utilizarlo en la generación de electricidad empleando biogás como combustible consiste en modificar levemente la presión de inyección del gas. El porcentaje de sustitución de biogás por gas es del 100%, pudiéndose realizar una conexión de la tubería de biogás al sistema de modo que el equipo pueda operar con ambos combustibles si se cree conveniente.

Este tipo de tecnología ofrece bajos costes de inversión, rápida puesta en marcha, buena fiabilidad con un adecuado mantenimiento y unas excelentes características de carga. Presentan un buen potencial de recuperación de calor, consiguiendo fácilmente unos rendimientos globales del 70 al 80%. Además, su alta eficiencia eléctrica hace que sus costes de operación sean menores. Por contra, sus costes de mantenimiento son mayores, debido a que son necesarias numerosas revisiones periódicas para cambiar los filtros de aceite del motor y las bujías.

### **Motores a biogás**

Los beneficios que conllevan la generación de biogás y su uso para generar energía han propiciado el desarrollo de esta tecnología. De esta forma han aparecido en el mercado empresas que ofertan grupos electrógenos preparados para funcionar exclusivamente con biogás. Un grupo electrógeno a biogás es una maquina que, a través de un motor de combustión interna cuyo combustible es biogás, mueve un generador eléctrico. El motor que se encarga de transformar la energía química contenida en el biogás en energía mecánica que hará girar el alternador. Al ser el combustible biogás, los motores que se emplean son de ciclo Otto y son estructuralmente similares a los motores a gas natural. Por su parte, el generador eléctrico se encarga de producir la energía eléctrica de salida a partir de la energía mecánica del motor. Generalmente se trata de alternadores autorregulados y sin escobillas, los cuales van acoplados de manera precisa al motor.

Como principales ventajas de los grupos electrógenos a biogás se puede decir que disponen de alternadores robustos y preparados para soportar las vibraciones que ocasiona la combustión de biogás, así como de motores de bajas revoluciones que aumentan la vida útil del mismo. Además, al tratarse de grupos electrógenos, contarán con un sistema de regulación del motor que permitirá trabajar con cargas variables. El regulador del motor es un dispositivo mecánico diseñado para mantener una velocidad constante del motor con relación a los requisitos de carga. La velocidad del motor está directamente relacionada con la frecuencia de salida del alternador, por lo que cualquier variación de la velocidad del motor afectará a la frecuencia de la potencia de salida.

Se trata de motores adecuados para biogás por lo que se evita realizar modificaciones que en los anteriores motores eran necesarias. Para un correcto funcionamiento de estos grupos electrógenos, el biogás deberá ser suministrado a una determinada presión que puede estar en el orden de 10-100 mbar. Desafortunadamente, la exclusividad de esta tecnología la lleva a ser más cara.

### 2.3.3 Elección de la tecnología de generación de electricidad

Tras haber decidido optar por una tecnología de obtención de energía que emplea motores de combustión interna, se realiza la elección del tipo de motor que se empleará en este proyecto.

Considerando las ventajas y desventajas expuestas en este mismo apartado sobre los distintos motores disponibles, se decide que la tecnología que se va a emplear para la generación de electricidad es un grupo electrógeno a biogás. Se trata de una tecnología menos extendida en la generación de electricidad con biogás, lo cual debe considerarse un aliciente para dar forma a un proyecto que aporte información empleando este tipo de tecnología emergente.



*Figura 7: Grupo electrógeno a biogás. Fuente: AQL Engineering*

El motivo principal que impulsa a esta elección es que se trata de la tecnología que más se adecúa al combustible que se va a emplear. Además, se contará con una garantía por parte de la empresa que suministra el equipo, cosa que se pierde en el caso de emplear un equipo que se modifique para el empleo de biogás.

El principal inconveniente que se encuentra en el empleo de un grupo electrógeno a biogás es su elevado precio de adquisición. Se trata de una desventaja no tan grande si se tiene en cuenta que la vida útil del equipo será presumiblemente mayor que en otras tecnologías por encontrarse adecuado a funcionar con biogás.

Por otro lado, el resto de tecnologías descritas con anterioridad no solo cuentan con la desventaja de ser tecnologías adecuadas para otros combustibles. Los motores a gasolina cuentan con la gran desventaja de la problemática a la hora de trabajar con cargas variables. Por su parte, los motores diesel, los cuales se presentan como una alternativa



viable debido a su robustez, no encajan en este proyecto debido a que no pueden funcionar únicamente con biogás sino que requieren un porcentaje importante de combustible diesel para su funcionamiento. Descartados estos dos y dado que la opción de un motor a gas natural es similar a la de uno a biogás, se opta por el equipo a biogás

El matadero en el cual se pretende implementar el sistema generador de electricidad dispone de mucha maquinaria, por lo que habrá variabilidad en la carga dependiendo de las horas del día. Además, se verá que el matadero genera una cantidad de residuos importante la cual permite obtener una gran cantidad de biogás, por lo cual este debe ser el único combustible a emplear. En base a esto se justifica el empleo de un grupo electrógeno a biogás como tecnología para generar energía eléctrica.



## 3. Diagnos del matadero municipal de Cochabamba

Este apartado pretende describir el matadero municipal de Cochabamba para conocerlo a fondo y así poder evaluarlo correctamente en apartados posteriores. Se procederá describiendo el emplazamiento del matadero, tanto su ubicación como los procesos que se desarrollan en el mismo. Se detallará en qué consiste el método de obtención de la carne ó “faeneo” aplicado en el matadero municipal de Cochabamba, enumerando la maquinaria que hay disponible en las instalaciones y describiendo los residuos que se generan en dicho proceso.

### 3.1 Localización, clima y emplazamiento

#### 3.1.1 Localización

Bolivia es considerada el corazón de Sudamérica, haciendo frontera con cinco países: Chile, Perú, Brasil, Paraguay y Argentina. Es el quinto país en extensión de Sudamérica con una superficie de 1.050.000 de km<sup>2</sup> y 10.426.155 habitantes. Esto lo convierte en el país de menor densidad poblacional de Latinoamérica (exceptuando las Guayanas) con 9,5 hab/km<sup>2</sup>. Se expande desde la cordillera de los Andes, con cumbres superiores a los 6500 m.s.n.m., hasta los llanos amazónicos con alturas de 600 a 100 m.s.n.m. Esta variación de alturas aporta una diversidad extraordinaria de climas, regiones, flora y fauna.

Bolivia se divide en nueve Departamentos, y estos a su vez en provincias y municipios. Los municipios son muy variables en tamaño, desde el tamaño de una ciudad (Cercado de Cochabamba 341 km<sup>2</sup>) hasta grandes extensiones como Charagua (Departamento de Santa Cruz) con 71.745 km<sup>2</sup>. La Capital es Sucre (poder judicial), pero la sede de gobierno (ejecutivo y legislativo) se encuentra en La Paz.

El Departamento de Cochabamba es el departamento que se encuentra situado en el centro geográfico del país y colinda con seis de los otros ocho departamentos bolivianos. Tiene una superficie de 55.631 km<sup>2</sup> y una población de 1.938.401 habitantes según el censo del año 2012. La capital del departamento es la ciudad de Cochabamba. Fueron los colonizadores Quechuas quienes le dieron al valle el nombre que tiene y que se compone de los vocablos “Qocha” y “Pampa”, que significan laguna y planicie, en alusión a la

abundancia de agua y a las suaves colinas aplanadas de clima tibio que caracterizan a la región.

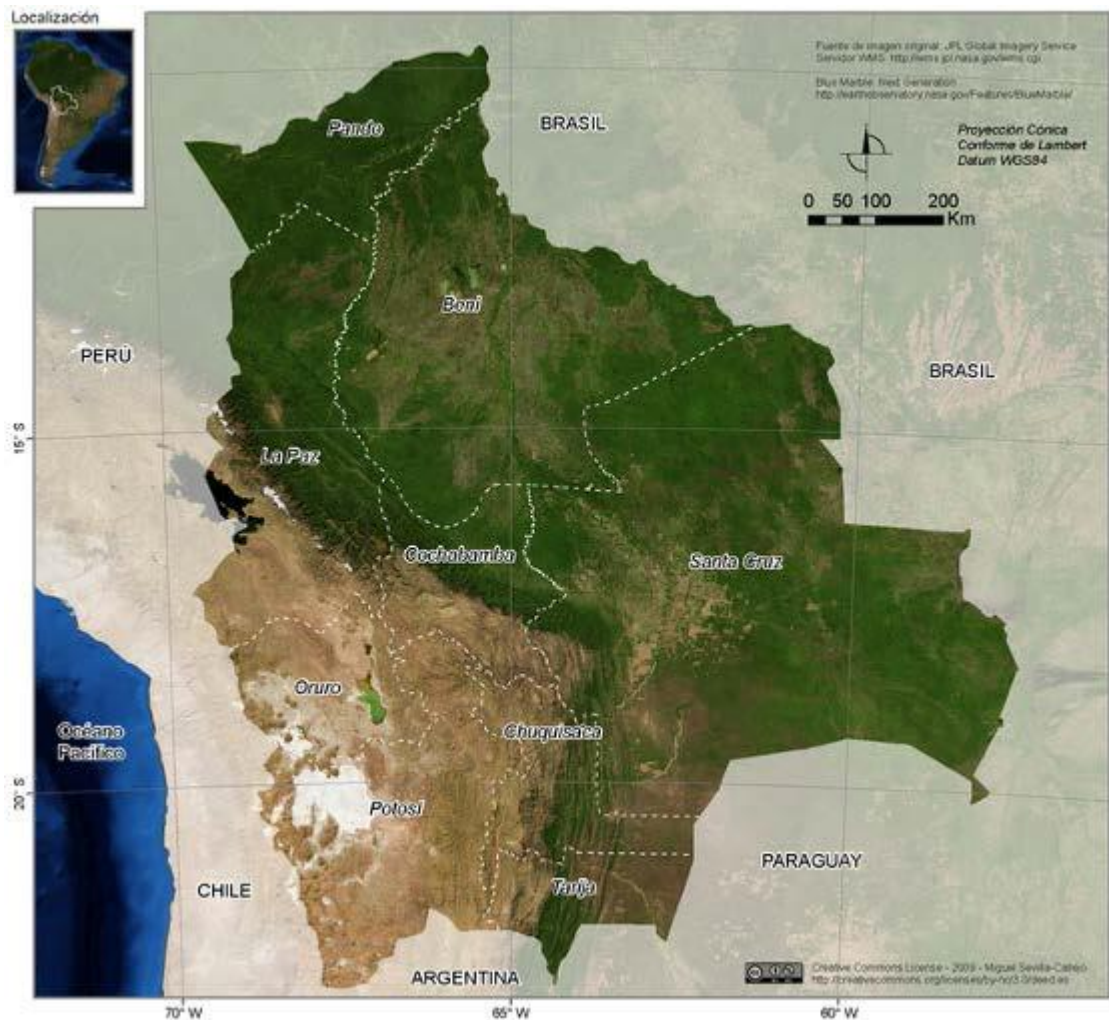


Figura 8: Mapa satelital de Bolivia. Fuente: SNV, Estudio de factibilidad para un programa nacional de biogás doméstico en Bolivia.

La capital del departamento es la ciudad de Cochabamba, la cual se encuentra en el centro del departamento en el municipio conocido como Cercado de Cochabamba. Esta ubicación geográfica la hace ser considerada el corazón de Bolivia. Se encuentra a una altitud de 2.570 msnm y se ubica en un gran valle al medio de la Cordillera de Los Andes. Estas características proporcionan a la ciudad un clima muy distinto al que se puede encontrar en otras ciudades del mismo país.



Figura 9: Provincia de Cercado (Departamento de Cochabamba). Fuente: Google Maps

### 3.1.2 Clima

Bolivia, está situada en el hemisferio sur del planeta. Esto hace que las estaciones frías (otoño e invierno) se produzcan entre los meses de mayo a septiembre. Por el contrario, la temporada caliente (primavera y verano) ocurre entre los meses de octubre y abril en la que es considerada como la temporada de lluvias.

Por su parte, Cochabamba posee un clima seco y templado. Las temperaturas en invierno no bajan más de 10°C y en verano no suben más de 30°C. La temperatura promedio anual se encuentra en torno a los 20°C. Este clima tan particular se debe a la situación geográfica de la ciudad, que la ubica en un gran valle.

Parámetros climáticos promedio de Cochabamba													
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
Temperatura máxima media (°C)	23	23	23	25	24	23	23	24	25	26	26	25	24
Temperatura media (°C)	18	18	18	17	15	13	13	15	17	18	20	19	17
Temperatura mínima media (°C)	13	12	12	10	6	3	3	6	9	11	12	13	9
Días de Precipitación	17	13	12	5	2	1	1	2	5	6	8	13	85

Tabla 4: Parámetros climáticos promedio de Cochabamba. Fuente: www.weatherbase.com

### 3.1.3 Emplazamiento

El Matadero Municipal se establece en la denominada zona sur de la ciudad, una zona en la que las calles no tienen nombre y accesible mediante transporte público. El terreno del matadero abarca una superficie total de 15000 metros cuadrados de los cuales

tan solo 1600 se encuentran edificados. Este terreno edificado corresponde a dos edificios: El edificio principal y el taller.



Figura 10: Emplazamiento del matadero municipal de Cochabamba. Fuente: Google Maps

El edificio principal abarca cerca de 1500 m<sup>2</sup> de parcela y consta de cuatro zonas diferenciadas en las cuales se desarrollan las principales actividades del matadero. La más importante de ellas es la destinada al proceso productivo, la cual recibe a las reses desde los corrales y concluye con la obtención de la carne. Dentro del mismo edificio, en una estancia separada de donde se lleva cabo el proceso productivo, se encuentran ubicadas las oficinas de los gestores del matadero y es en donde se llevan a cabo las labores administrativas. También se ubican en este edificio unos vestuarios y un comedor, los cuales están destinados al uso por parte de los trabajadores del matadero.

El taller es un edificio de unos 140 metros cuadrados cuya labor principal es reparar la maquinaria que resulte dañada en el proceso productivo. Es un taller sencillo pero que cuenta con los principales repuestos de la maquinaria empleada en el proceso productivo y cumple con la labor de abordar las averías en el mismo lugar en el que ocurren. Se evita con esto parones prolongados en el proceso productivo, algo que ocurriría en caso de tener que acudir a un taller más alejado.

Por otro lado, en la zona sin edificar se encuentran los establos, los cuales abarcan una superficie aproximada de unos 1100 metros cuadrados y es donde permanecen las reses desde su recepción hasta que son llevadas al edificio principal. Se puede observar en el terreno sin edificar la existencia de unas lagunas antiguamente empleadas para almacenar deshechos. Actualmente, una de dichas lagunas se encuentra acondicionada

para almacenar el biol que generan los biodigestores actuales. Las lagunas que se encuentran sin acondicionar no tienen actualmente ningún uso y el objetivo del matadero es emplear este espacio para albergar el futuro sistema de tratamiento de aguas residuales que permita tratar la totalidad de las mismas. Además, en el exterior del matadero se ubican elementos como la caldera, la incineradora y los biodigestores los cuales se comentarán en el apartado 3.4.

## 3.2 Horas de funcionamiento

El matadero municipal se encuentra operativo de lunes a sábado, hecho que le lleva a funcionar un promedio de 26 días al mes. A las 7:00 se comienza a procesar las reses para la obtención de la carne. Dicho proceso es designado en el matadero como “tiempo de faeneo” y abarca entre 6 y 8 horas diarias (tiempo que varía en función de las reses que se procesen). La demanda siempre exige sacrificar un rango de entre 250 y 300 reses diarias, cantidad que hace del matadero municipal de Cochabamba el más importante de la ciudad ya que abastece a casi el 80% de los mercados que hay en la misma. Debido a que la demanda de carne es impredecible, se da el caso de días en los que se llegan a procesar más de 350 reses alargándose el tiempo de faeneo. En cualquier caso, para estimaciones posteriores, se considerará que el matadero opera por un promedio de 8 horas diarias durante 26 días al mes.

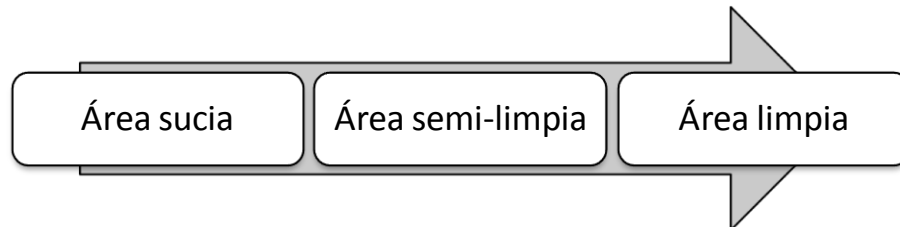
Días de operación (promedio)	26 [días/mes]
Horas de faeneo (promedio)	8 [h/día]

A pesar de que la obtención de la carne de res lleva entre 6 y 8 horas, la actividad en el matadero no cesa a lo largo de todo el día. Por un lado son necesarias unas labores de limpieza del edificio, las cuales llevan a cabo los propios trabajadores una vez finalizado el mismo. Por otro lado, el matadero cuenta con varios operarios que se encargan de deshacerse de los residuos y cuya jornada laboral comienza a la tarde. Además, al caer la noche, el sereno comienza con un largo turno de vigilancia que se extiende hasta el comienzo de la jornada laboral del día siguiente. De madrugada el corralero acompaña al sereno ya que es cuando se reciben las reses que se sacrifican al día siguiente.

## 3.3 Descripción del proceso productivo

El proceso de obtención de la carne de res es designado en el matadero municipal de Cochabamba como “faeneo” y comprende una larga cadena de actividades. Comienza desde que las reses son transportadas al matadero y almacenadas en corrales y finaliza con la obtención de la carne tras ser procesadas en el edificio principal. Dicho edificio se

compone de tres áreas diferenciadas y en cada una se lleva a cabo una serie de procesos concretos. Estas áreas son denominadas como el área sucia, el área semi-limpia y el área limpia. El personal, los equipos así como los materiales y productos que se manipulan en esta zona no deben acceder hacia otras áreas de trabajo en el matadero para evitar que se produzca contaminación. En este apartado se describirán las actividades que se realizan en cada una de estas áreas.



*Figura 11: Esquema del proceso productivo del matadero*

### 3.3.1 Corrales

En los corrales únicamente tiene lugar la recepción de las reses. Estas son traídas en camiones normalmente por proveedores asiáticos debido a que este tipo de vacas se adaptan mejor al clima cochabambino. No hay un periodo prefijado durante el cual las vacas permanecen en los corrales. El tiempo que permanezcan en los mismos depende de la demanda de carne que tenga la ciudad de Cochabamba en ese momento. Es aconsejable que las vacas permanezcan unas 5 horas en los corrales debido a que el viaje en camión puede llegar a estresarlas y hacer que su carne sea de peor calidad. En cualquier caso esto no siempre se cumple ya que a veces es necesario sacrificarlas inmediatamente para poder cubrir la demanda.



*Figura 12: Corrales del matadero*



### 3.3.2 Área sucia

Es el primer área al que se llevan las reses y en ella se realizan los siguientes procesos:

#### **Ingreso a faena por manga con ducha**

Las reses ingresan en el área sucia desde los corrales a través de un pasillo denominado manga de transporte. Durante este transporte se somete a los animales a un lavado. Este lavado es importante para mantener la higiene y a posteriori poder conservar las pieles. Al final de la manga de transporte se encuentra el "cajón de noqueo" en el que se introduce un animal por vez para su respectivo aturdimiento.

#### **Aturdimiento**

El objetivo del aturdimiento o "noqueo" es dejar que los animales entren en un estado de inconsciencia que se prolongue hasta su muerte por desangrado con el fin de evitarle cualquier dolor a sufrimiento innecesario. En términos del bienestar animal, se debe evitar el estrés y sufrimiento de los animales durante su aturdimiento, lo cual además contribuye a mejorar la calidad de la carne. El método usado para el aturdimiento de las reses en el matadero municipal de Cochabamba es la conmoción cerebral empleando una bayoneta. Debido a que los animales no están completamente inmovilizados en los cajones de noqueo, es necesario a veces que los trabajadores suministren hasta cuatro golpes o punzadas a cada animal para su completo aturdimiento, lo que aumenta su sufrimiento y estrés.

#### **Encarrillado**

Los animales aturdimientos son desalojados del cajón de noqueo por una puerta lateral y son colgados a un riel de transporte con una cadena colocada alrededor de una de las patas traseras. El animal es conducido con la ayuda de un motor a través del riel hacia la zona del degollado y desangrado.

#### **Degollado y desangrado**

El objetivo del degollado es provocar el desangrado de los animales antes de que el animal recobre la conciencia y se efectúa cortando las arterias mayores del cuello empleando un cuchillo. Por su parte, el desangrado tiene como objetivos matar al animal dañando lo mínimo posible el producto cárnico y remover rápidamente la mayor cantidad posible de sangre, ya que esta es un medio para el crecimiento de bacterias y puede empeorar la calidad del producto. El matadero consta de un colector de sangre sobre el cual las reses son degolladas formándose así la primera de las líneas de residuos. En el caso

del matadero la sangre no se almacena ni se aprovecha por lo que finalmente termina mezclándose con el efluente total de deshechos.

#### **Extracción de pezuñas y cabeza**

El objetivo de separar la cabeza y las pezuñas es facilitar el procesamiento de las mismas y evitar la contaminación del producto final. Tanto las cabezas como las pezuñas delanteras y traseras son separadas de los cuerpos mediante corte manual. Disponer de ellas no supone un problema para los mataderos ya que son comercializadas.

#### **Desollado**

El objetivo del desollado es desprender la piel del animal para evitar la contaminación del producto cárnico así como la obtención del cuero para su posterior comercialización. El desollado debe ejecutarse sin causar orificios ni tajos que disminuyan el valor comercial del cuero. Esta operación se realiza de manera manual ya que en el matadero no se dispone de máquinas desolladoras. Las pieles son sacadas de la línea de faeneo hacia salas en las que se realiza el acondicionamiento de las mismas para su comercialización. Con la finalidad de evitar la diseminación de enfermedades de un animal a otro se debe esterilizar los cuchillos con agua a 82°C. Esta es una acción que no se lleva a cabo en el matadero y que pretende cubrirse en el futuro empleando parte del biogás que se consiga generar en una caldera.

### **3.3.3 Área semi-limpia**

En el área semi-limpia se genera una alta cantidad de residuos pero la suciedad es menor que en el área sucia, de ahí su nombre. Los procesos que se llevan a cabo en esta área son los siguientes:

#### **Eviscerado**

El objetivo del eviscerado es desprender las vísceras abdominales (estómagos e intestinos) además de otros órganos del interior del animal. Esta operación requiere de un tratamiento preliminar de lavado tanto de los intestinos como de los estómagos que da lugar al más abundante de los efluentes de agua residual del matadero. Los órganos con los que no se comercializa son llevados a la incineradora en donde son quemados. Dicha incineradora funciona actualmente con leña y supone un gasto que puede evitarse en caso de acondicionar la misma para su funcionamiento con biogás.

### **Corte de pecho**

El objetivo del corte de pecho es dividir las carcasas del animal para facilitar la manipulación y la limpieza de la carne. Es necesario ya que de esta forma, durante el lavado, se eliminarán fragmentos cárnicos y restos sanguíneos que afectarían negativamente a la calidad del producto.

### **Inspección post mórtem**

El objetivo de la inspección post mórtem es identificar las enfermedades animales en las carcasas divididas, estómagos, órganos e intestinos. Los veterinarios hacen esta inspección por diagnóstico visual y en forma individual. En caso de decomisarse algún órgano este es llevado a la incineradora.

## **3.3.4 Área limpia**

En esta área se generan aguas residuales debidas al lavado pero cuyo contenido en materia orgánica no es muy elevado. Tan solo tienen lugar dos procesos:

### **Lavado de carcasas**

El objetivo de esta operación es remover el polvo, los restos de huesos del dividido y las manchas de sangre mejorando la apariencia de las carcasas. La limpieza se realiza con pistolas de agua a presión y esta agua no requiere ser calentada.

### **Oreo de las carcasas**

Los objetivos de orear las carcasas son escurrir el exceso de agua empleada en el lavado y lograr el descenso del pH de la carne de la carcasa para transformar el músculo en carne. Al eliminar el exceso de agua se mejora el aspecto de la carne y se evita el riesgo de que se descomponga de manera temprana. En las salas de oreo la carne permanece más de dos horas y de ahí pasan directamente a los camiones encargados de su distribución por los distintos mercados de la ciudad.



Figura 13: Área limpia del matadero

### 3.4 Descripción de la maquinaria existente

El matadero municipal de Cochabamba consta de una amplia maquinaria necesaria tanto para la realización del proceso productivo (Motores de transporte, sierras, etc.) como para gestionar y tratar los residuos generados (Bombas, decantador, etc.). A continuación se expondrá la información correspondiente a estos equipos.

Se completará el apartado proporcionando información sobre el resto de tecnología que dispone el matadero. Por un lado la caldera y la incineradora, los cuales se consideran elementos importantes a que en un futuro se habilitarán para su funcionamiento con biogás y por otro lado los biodigestores que se encuentran actualmente operando en el matadero.

#### 3.4.1 Maquinaria

En las tablas posteriores se muestran los equipos de los que dispone el matadero municipal. Se han dividido en planta interior y planta exterior para diferenciar entre los equipos involucrados en el faeneo y los involucrados en la gestión de los residuos generados. A pesar de que todos los equipos que se muestran se encuentran disponibles muchos de ellos no se usan.

<b>Planta interior</b>			
<b>Equipos</b>	<b>Número</b>	<b>Potencia (hp)</b>	<b>Potencia (kW)</b>
Motor transporte de ganado	1	5	3,7
Motor colgado de ganado	1	5	3,7
Motor colgado de ganado 2	1	5	3,7
Motor colgado de ganado 3	1	4	3,0
Sierra espalda	2	3	2,2
Sierra pecho	2	2	1,5
Compresora	1	5,5	4,1
Ventilador	3	1	0,7

Tabla 5: Maquinaria planta interior. Fuente: Rada & Asociados

<b>Planta exterior</b>			
<b>Equipos</b>	<b>Número</b>	<b>Potencia (hp)</b>	<b>Potencia (kW)</b>
Motor de lodos	2	5,5	4,1
Decantador	1	7,5	5,6
Saranda	1	7,5	5,6
Bombas	2	7,5	5,6
Motor pequeño	2	5,5	4,1

Tabla 6: Maquinaria planta exterior. Fuente: Rada & Asociados

### 3.4.2 Caldera

Actualmente el matadero dispone de una caldera instalada hace más de 20 años. Dicha caldera se instaló para funcionar con GLP (gas licuado de petróleo) que es uno de los combustibles más empleados en Bolivia y actualmente no se encuentra en funcionamiento. Se compró inicialmente con la intención de calentar agua para destinarla al lavado y desinfección de herramientas y al calentamiento de la sangre en la fase inicial del tratamiento de residuos. La caldera tan solo llegó a usarse una vez, por lo que nunca ha formado parte del proceso productivo. Se trata de tecnología obsoleta, pero que evitará tener que adquirir una nueva.

En caso de implementar la caldera para su funcionamiento con biogás no habría un ahorro de materia prima ya que, al no estar en funcionamiento, no hay gasto de combustible. Lo que se conseguiría es poder cubrir unos procesos que actualmente no se cubren con un coste cero en combustible.



Figura 14: Caldera del matadero municipal de Cochabamba

### 3.4.3 Incineradora

La incineradora del matadero se encuentra actualmente en uso y se emplea para quemar los órganos que no se pueden comercializar. Dicha incineradora funciona a base de leña unas dos o tres veces por semana y durante 5 horas diarias. En el futuro se pretende sustituir la leña por el biogás que se genere al tratar las aguas residuales del matadero. De este modo se conseguirá un ahorro en materia prima ya que el biogás generado por el matadero no tiene coste. Por el contrario, un camión de leña tiene un costo de 1600Bs y con él puede cubrirse la demanda de la incineradora durante aproximadamente 20 días.

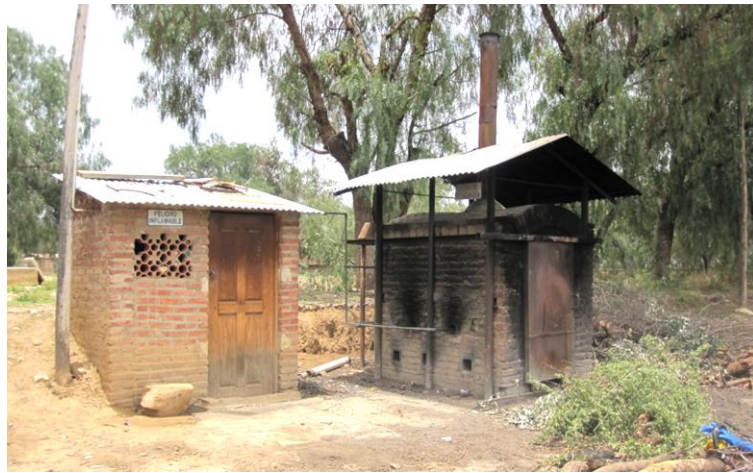


Figura 15: Incineradora del matadero municipal de Cochabamba

### 3.4.4 Biodigestores

Actualmente el matadero dispone de tres biodigestores en serie que tratan diariamente unos 1000 litros de agua residual y que permiten obtener mediante el proceso de digestión anaerobia biogás apto para la combustión y biol de calidad contrastada.

Estos biodigestores forman parte de la tecnología conocida como biodigestores familiares de bajo costo, designada así debido a su sencillez en la construcción y a que esta es llevada a cabo empleando materiales económicos. Estas características están llevando a este tipo de biodigestores a introducirse en comunidades rurales aisladas y de países en vías de desarrollo ya que aportan el doble beneficio de conseguir solventar la problemática energética-ambiental, así como realizar un adecuado manejo de los residuos tanto humanos como animales.

Los tres biodigestores de los que dispone el matadero están dispuestos en serie, de tal forma que la biodegradación de la materia orgánica va teniendo lugar por etapas, degradándose más en el primero de ellos y menos en el último. Actualmente se tratan 1000 litros de agua residual al día, lo cual supone tratar menos del 1% de las aguas residuales que genera el matadero. Esto se debe a que la principal labor de los biodigestores instalados es la realización de pruebas que permitan conocer las posibilidades del matadero a la hora de tratar los residuos. Los resultados empleados permitirán diseñar correctamente el sistema de tratamiento de aguas residuales que permita tratar la totalidad de las mismas. Hasta el momento dichas pruebas han permitido apreciar que la mezcla de residuos que componen las aguas residuales del matadero permite producir una gran cantidad de biogás con un contenido en metano que lo hace apto para la combustión.



Figura 16: Biodigestores del matadero municipal de Cochabamba

## 3.5 Residuos generados en el matadero

En el matadero se generan un total de 162500 litros de agua residual al día que puede ser empleada para generar biogás. Esta agua residual es una combinación de los distintos residuos que se generan en el mismo. Dichos residuos se generan en el proceso de obtención de la carne de res y se pueden dividir en los siguientes grupos:

- Línea verde
- Línea roja
- Grasas
- Bosta

Cada residuo tiene una composición particular y es tratado de diferente manera. Lo que albergan en común es que pueden ser aprovechados por un biodigestor para generar biogás debido a su contenido en materia orgánica. Mezclando todas las líneas y alimentando a un biodigestor provocaríamos el proceso de codigestión anaeróbica<sup>7</sup>.

### 3.5.1 Línea verde

Dicha línea la componen los residuos procedentes del vaciado del estomago de las reses. Por lo general cada res genera 30 kg de este residuo. La línea verde debe ser tratada para la obtención de aguas residuales aprovechables por los biodigestores. Inicialmente, la línea verde consta de un filtro que se encarga de separar las partículas más grandes. Dichas partículas no tienen ninguna aplicación y son botadas al alcantarillado. Tras esto la línea verde es llevada a lo largo de trece cubículos en los cuales, mediante flotación, se separan el resto de sólidos. Dichos sólidos son almacenados para su posterior comercialización

<sup>7</sup> Tratamiento anaeróbico conjunto de residuos orgánicos de diferente origen y composición

como abono. Tras este proceso la línea verde pasa a ser totalmente líquida y es conducida al “cuarto de lodos” en donde se mezcla con el resto de líneas. El aporte de la línea verde a la generación de aguas residuales es el más importante de todos, llegando a ser un 70% de las mismas.



*Figura 17: Línea verde del matadero municipal de Cochabamba*

### 3.5.2 Línea roja

La línea roja recibe este nombre debido a que está compuesta por la sangre de las reses. En general esta línea contiene todos los residuos generados en el desangrado del animal, que se estima son unos 13 litros por cada res. De los residuos generados para la línea roja, el 90% se separa y comercializa para la elaboración de alimentos. Tras esta separación, la línea roja queda totalmente líquida y es conducida al cuarto de lodos en donde pasa a formar parte del efluente total de aguas residuales llegando a ser un 20% de las mismas.



*Figura 18: Línea roja del matadero municipal de Cochabamba*



### 3.5.3 Grasas

Las grasas animales son un residuo propio de las reses y cada una produce en torno a 400 gramos. El 70% de las grasas se comercializa mientras que el 30% restante pasa a formar parte de la corriente de aguas residuales.

### 3.5.4 Bosta

La bosta es como se denomina a las heces de las vacas. En el matadero las reses permanecen recluidas en corrales durante las horas previas a su sacrificio. Es mediante la limpieza del corral como se obtiene este residuo. La cantidad de bosta que genera cada res depende de muchos factores y por ello varía entre un kilo y medio y cuatro kilos por animal. Al igual que los sólidos extraídos por flotación de la línea verde, los residuos de la bosta también se comercializan como abono, aunque hay un porcentaje que pasa a formar parte de las aguas residuales.



Figura 19: Recogida de la bosta en el matadero municipal de Cochabamba

### 3.5.5 Cuarto de lodos

El cuarto de lodos es una fosa en donde confluyen todas las líneas de residuos anteriormente nombradas. Unos 162000 litros de agua residual pasan diariamente por este cuarto, de los cuales 1000 litros son llevados al sistema de tratamiento de residuos que hay actualmente en el matadero mientras que el resto pasan directamente del cuarto de lodos al alcantarillado sin recibir ningún tipo de tratamiento.



Figura 20: Cuarto de lodos del matadero municipal de Cochabamba

### 3.5.6 Resumen

La generación de semejante cantidad de agua residual es lo que otorga al matadero la posibilidad de producir grandes cantidades de biogás mediante la implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales. Esto es posible debido a que todas las líneas de residuos están compuestas en mayor o menor medida por materia orgánica, lo cual permite asegurar que el agua residual que llega al cuarto de lodos es adecuada para alimentar un biodigestor y producir biogás. El proyecto de generación de electricidad que se planteará considerando que se dispone de dicha producción de biogás.

Residuos Generados	
Línea Verde	30 kg/animal
Línea Roja	13 L/animal
Grasas	0,4 kg/animal
Bosta	1,5 - 4 kg/animal
Agua Residual Total	162500 L/día

Tabla 7: Residuos generados en el matadero municipal de Cochabamba

## 4. Análisis de la demanda

La diagnosis realizada al matadero ha permitido conocer a fondo el mismo en términos de ubicación y funcionamiento de las instalaciones. Para elegir y dimensionar el sistema de generación de electricidad más adecuado se requiere ampliar dichos conocimientos en términos de demandas energéticas. Es por ello que en este apartado se analizará la demanda de energía del matadero, tanto eléctrica como térmica.

### 4.1 Sistema eléctrico de alimentación y distribución del matadero

El sector eléctrico en Bolivia fue privatizado a principios de los años 90 y se dividió en generación, transmisión y distribución. Estas tres etapas son desarrolladas por dos grupos de sistemas eléctricos reconocidos en la Ley de Electricidad: el Sistema Interconectado Nacional (SIN), que de forma unificada provee de energía eléctrica a las principales ciudades del país; y los sistemas aislados y autoproductores, que proveen de energía eléctrica a las poblaciones más pequeñas.

El SIN lo conforman instalaciones de generación, transmisión y distribución y tiene la función de suministrar energía eléctrica a los departamentos de La Paz, Santa Cruz, Cochabamba, Oruro, Potosí y Chuquisaca. El SIN se construyó en 1965 e inicialmente conectaba las demandas de Oruro y Cochabamba. En la década de los 80 se completó el tendido conectando las ciudades de La Paz, Oruro, Potosí, Cochabamba y Sucre. Posteriormente se amplió hasta Santa Cruz constituyéndose el SIN tal y como es conocido actualmente. Dado que el matadero está localizado en la ciudad de Cochabamba, el suministro de energía eléctrica de las instalaciones es llevado a cabo por el Sistema Interconectado Nacional (SIN).



Figura 21: Logotipo de ELFEC S.A.

Dentro del SIN la empresa encargada de distribuir la energía eléctrica en el Departamento de Cochabamba es ELFEC. En sus comienzos la empresa ELFEC se dedicaba principalmente a la generación de energía eléctrica, pero con el paso del tiempo esto dejó de ser así. Se instalaron las plantas de Corani y Santa Isabel, las cuales se encargaron de generar dejando a ELFEC únicamente la función de satisfacer la demanda a través de una

buena distribución. Este hecho marcó el final de una etapa para ELFEC, que pasó a formar parte del Sistema Interconectado Nacional como empresa encargada de la distribución.

El servicio de suministro es facturado en función de la potencia contratada por lo clientes, la cual es establecida por ELFEC. Para ello, ELFEC determina el valor de la potencia máxima que requiere el cliente empleando un contador, el cual toma muestras de la potencia promedio en períodos de 15 minutos. La mayor demanda del mes promediada cada 15 minutos es la que la distribuidora ELFEC considera como potencia contratada y la que emplea para diferenciar a sus clientes. Dicha diferenciación los divide en clientes residenciales y grandes clientes, siendo estos últimos aquellos que requieren una potencia máxima superior a 10 kilovatios. A su vez, dentro de los grandes clientes se distinguen dos categorías:

- Categoría de Mediana Demanda: La potencia contratada por este sector de la clientela está entre 11 y 50 kilovatios. La potencia que el cliente contrata viene establecida por su demanda máxima medida en cualquier momento del día.
- Categoría de Gran Demanda: La potencia contratada por este sector es igual o superior a los 51 kilovatios. La potencia que el cliente contrata viene establecida por la demanda máxima medida en la franja horaria de máximo consumo (de 18:00 a 23:00) y la demanda máxima medida en horario fuera de punta (resto del día). Basta con una demanda igual o superior a 51 kW en cualquier franja horaria para fijarse la categoría Gran Demanda.

Los distintos cargos que ELFEC aplica al realizar la facturación se detallan en la siguiente tabla:

Tipo de cargo	Descripción
<b>Cargo fijo</b>	El cargo fijo es un importe que cubre parcialmente los costos de mantenimiento, administrativos, comerciales y financieros en los que incurre ELFEC S.A. para el suministro de electricidad al usuario. El cobro de este cargo es obligatorio exista o no consumo registrado en el medidor del suministro. En las categorías Domiciliarias de Pequeña Demanda y Baja tensión a la cual corresponde la mayoría de los suministros el cargo fijo se lo denomina como "Cargo Mínimo" y brinda el derecho a consumir 20 [kWh] en el mes, este mismo derecho se aplica a la categoría General 1. La aplicación del cargo fijo se encuentra estipulada en la Resolución SSDE N°162/2001.
<b>Cargo variable o por energía</b>	Este cargo cubre los costos de generación y transporte de la energía hasta el punto de suministro, de la misma forma incorpora los costos resultantes de contar con la capacidad instalada en infraestructura para soportar el flujo de corriente. Este cargo es calculado a partir del consumo de energía realizado por el cliente e incluye únicamente la energía activa consumida. La empresa ELFEC no impone un cargo directo al consumo de energía reactiva, pero sí se aplica una penalización económica cuando el consumo de energía reactiva excede un valor máximo establecido en términos de factor de potencia.
<b>Cargo por potencia</b>	Este cargo solamente se cobra a clientes calificados como clientes de mediana y gran demanda (potencia contratada superior a los 10 kW) y está destinado a cubrir los costos de capacidad en los que incurre la distribuidora. Estos costos también existen en los clientes de pequeña demanda pero son menos significativos y son asociados a otros cargos, en cambio en los clientes de mayor demanda tienen una relevancia mayor ya que en muchos casos la red debe ser adecuada y mantenida con mayor infraestructura para poder brindar el suministro requerido. Al ser principalmente un costo de infraestructura su cobro está asociado a la medición de la capacidad demandada por el suministro medida en kW. La medición de la capacidad demandada es reiniciada en forma anual en el mes de Noviembre.

Tabla 8: Cargos aplicados en la tarificación de la electricidad. Fuente: ELFEC S.A.

Según la tarificación de ELFEC, el matadero municipal es considerado dentro del grupo de mediana demanda debido a que contratan mensualmente una cantidad mayor a 10 kW pero inferior a 50 kW. Concretamente el matadero contrata 30 kW, aunque actualmente ELFEC tarifica 35 kW debido a que en algún momento en este último año se registró una potencia máxima cercana a ese valor. Además, ELFEC distribuye al matadero mediante una red de media tensión de 24,9 kW con un factor de potencia de la distribución de 0,82. A pesar de que ELFEC exige un factor de potencia de 0,85 no penaliza al matadero por ello por ser un demandante medio.



Figura 22: Transformador de 200 kVA del matadero municipal de Cochabamba

## 4.2 Demanda eléctrica actual

Este apartado se centrará en estudiar la demanda de electricidad del matadero a partir de algo tan sencillo como sus facturas eléctricas. A partir de ellas se verán cuales fueron los consumos en los años 2010, 2011 y 2012 y se valorará dicha información para llegar a la conclusión de cuanta electricidad consume el matadero municipal de Cochabamba.

### 4.2.1 Datos de las facturas eléctricas

En este apartado se incluye la información de las facturas eléctricas de los años 2010, 2011 y 2012 de forma que se puede apreciar el gasto de energía eléctrica en los últimos meses y años.

En la siguiente tabla se muestra el consumo de energía eléctrica y los pagos efectuados a ELFEC en los meses del año 2010.

Consumo Año 2010		
Meses	Consumo (kWh)	Coste en Bs.
Enero	sin datos	sin datos
Febrero	sin datos	sin datos
Marzo	sin datos	sin datos
Abril	8207	sin datos
Mayo	8996	sin datos
Junio	8026	sin datos
Julio	8935	sin datos
Agosto	9178	sin datos
Septiembre	8571	sin datos
Octubre	8086	sin datos
Noviembre	9481	sin datos
Diciembre	8511	sin datos

Tabla 9: Datos facturas eléctricas 2010. Fuente: Rada & Asociados

En la siguiente tabla se muestra el consumo de energía y los pagos efectuados a ELFEC en los meses del año 2011.

<b>Consumo Año 2011</b>		
<b>Meses</b>	<b>Consumo (kWh)</b>	<b>Coste en Bs.</b>
<b>Enero</b>	9057	sin datos
<b>Febrero</b>	8753	sin datos
<b>Marzo</b>	9117	sin datos
<b>Abril</b>	10816	sin datos
<b>Mayo</b>	11908	sin datos
<b>Junio</b>	10573	sin datos
<b>Julio</b>	10513	sin datos
<b>Agosto</b>	10998	sin datos
<b>Septiembre</b>	10088	sin datos
<b>Octubre</b>	7965	sin datos
<b>Noviembre</b>	8450	sin datos
<b>Diciembre</b>	6752	3148

Tabla 10: Datos facturas eléctricas 2011. Fuente: Rada & Asociados

En la siguiente tabla se muestra el consumo de energía y los pagos efectuados a ELFEC en los meses del año 2012.

<b>Consumo Año 2012</b>		
<b>Meses</b>	<b>Consumo [kWh]</b>	<b>Coste en Bs.</b>
<b>Enero</b>	7540	3603,4
<b>Febrero</b>	8389	3780
<b>Marzo</b>	7358	3498
<b>Abril</b>	7601	3591,5
<b>Mayo</b>	8753	3955,8
<b>Junio</b>	6873	3375,6
<b>Julio</b>	6388	3248,9
<b>Agosto</b>	6812	3395,6
<b>Septiembre</b>	6388	3243,5
<b>Octubre</b>	5538	2646,6
<b>Noviembre</b>	7296	3486,8
<b>Diciembre</b>	5963	2849,7

Tabla 11: Datos facturas eléctricas 2012. Fuente: Rada & Asociados

#### 4.2.2 Análisis del consumo de electricidad

A continuación se analizarán conjuntamente las facturas de los últimos años, cuyos datos se han mostrado en el apartado 4.1.1 y se decidirá qué datos tener en cuenta para estimar la demanda del matadero municipal de Cochabamba.

En la gráfica posterior se puede ver la diferencia de consumos entre los años 2010, 2011 y 2012 de manera conjunta:

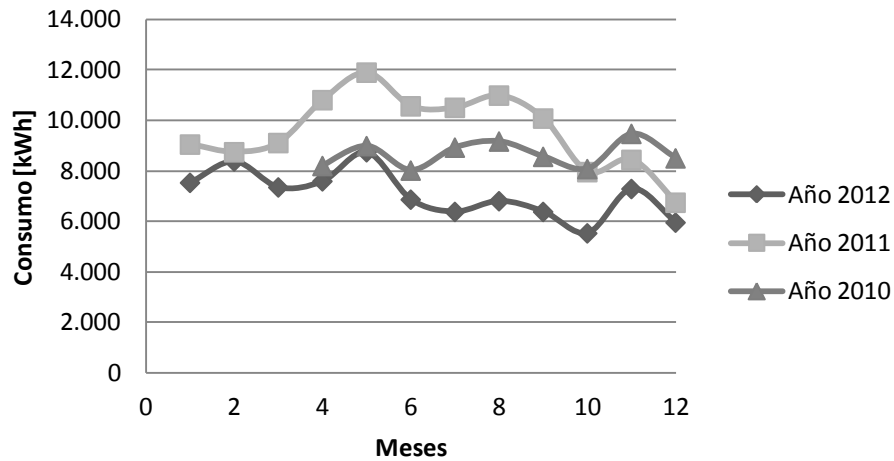


Figura 23: Consumos de electricidad años 2010, 2011 y 2012

Se puede apreciar claramente que en el año 2012 el consumo ha sido mucho menor al del año 2011. Así mismo, también es menor que el que se produjo en 2010. La explicación a estas diferencias se debe a los diferentes modelos de gestión que ha habido estos últimos años en el matadero.

En 2010, la empresa gestora del matadero era EMBECA, empresa que había estado a cargo del matadero durante los anteriores 15 años. Durante su gestión, dichos gestores llevaron a cabo una importante inversión en maquinaria que les permitió procesar trescientas reses en aproximadamente doce horas.

El 22 de Noviembre de 2010 se produjo un cambio de gestores y el matadero pasó a ser guiado por la empresa SOBECA. Dicha empresa optó por continuar con el proceso tal y como lo realizaban los anteriores gestores, es decir, procesando trescientas reses en unas doce horas. La gestión de SOBECA duró tan solo un año.

El 22 de Noviembre de 2011 se produjo la entrada de unos nuevos gestores y que son los que actualmente dirigen el matadero. La gerencia de Rada & Asociados decidió optimizar el proceso de forma que lograron procesar el mismo número de reses que los anteriores gestores en un tiempo menor. Actualmente procesan una media de trescientas reses en un tiempo cercano a ocho horas. Esta reducción del tiempo es lo que ha llevado a reducir drásticamente los consumos de electricidad del matadero.

Además se han llevado a cabo otras medidas que han permitido reducir este consumo. Una de las medidas más importantes fue adoptar un sistema de lavado de herramientas que reducía el empleo de bombas. También se llevó a cabo la construcción de una pequeña ferretería y de un pequeño taller dentro del recinto del matadero. De esta forma las averías pueden comenzar a corregirse desde el momento en que se producen.



Los anteriores gestores tenían que recurrir a talleres externos y esto suponía una pérdida de tiempo que les llevaba a estar varios días sin alguna de las maquinas, de forma que aumentaba el tiempo de trabajo.

En vista de esto es fácil entender las diferencias de consumos en los distintos años. La nueva gestión llevada a cabo por Rada & Asociados hace que se consuma menos que lo que se hacía antaño y es una gestión que se va a mantener y, por tanto, no se volverá a llegar a los niveles de consumo alcanzados en los años anteriores. Es por ello que, para estimar el consumo del matadero, se van a analizar únicamente los datos de este último año en el que ha hecho entrada la nueva gestión de Rada & Asociados.

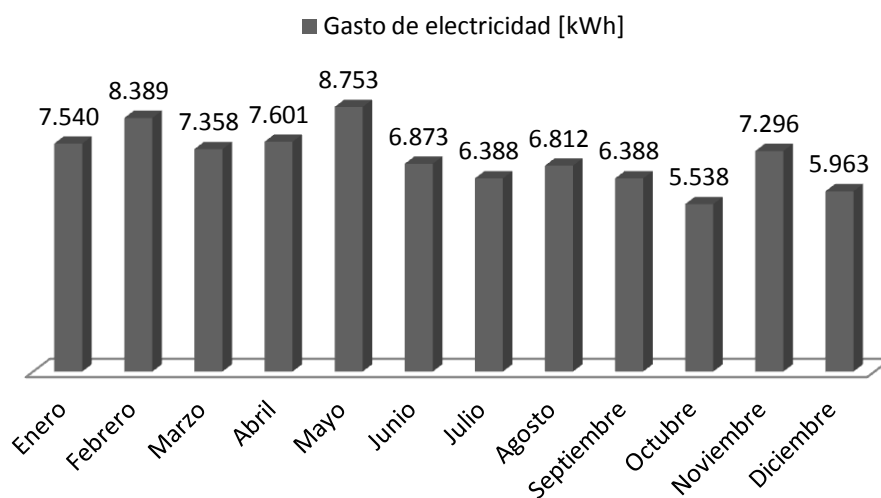


Figura 24: Demanda de electricidad año 2012

La demanda máxima del año 2012 se da en el mes de mayo. Observando las gráficas de años anteriores se podría llegar a pensar que hay una tendencia en los consumos dependiendo del mes del año ya que parece ser que mayo es en el que más se consume. En realidad esto es una coincidencia. Los meses en los que más carne se produce y por tanto en los que más horas está operativo el matadero son los meses de Diciembre, Enero y Febrero. Esto se debe a la presencia de fechas especiales como navidad, año nuevo y los carnavales. No hay una explicación a que el consumo máximo se produzca en el mes de mayo porque, aunque en dicho mes hay feriado, no se produce más cantidad de carne que en el resto de meses.

Para poder realizar el dimensionamiento del sistema de generación de energía eléctrica del matadero se considerará el consumo más elevado durante el tiempo de gestión de Rada & Asociados. Por tanto, se tomará como dato de demanda máxima actual la que se da en el mes de mayo de 2012 y que es de 8753 [kWh].

Consumo Año 2012		
Meses	Consumo (kWh)	Coste en Bs.
Enero	7540	3603,4
Febrero	8389	3780
Marzo	7358	3498
Abril	7601	3591,5
<b>Mayo</b>	<b>8753</b>	<b>3955,8</b>
Junio	6873	3375,6
Julio	6388	3248,9
Agosto	6812	3395,6
Septiembre	6388	3243,5
Octubre	5538	2646,6
Noviembre	7296	3486,8
Diciembre	5963	2849,7
<b>TOTAL</b>	<b>84899</b>	<b>40675,46</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>7075</b>	<b>3389,62</b>

Tabla 12: Resumen facturas eléctricas año 2012

### 4.3 Demanda eléctrica futura

El departamento de Cochabamba en general y la provincia de cercado en donde se ubica la ciudad de Cochabamba se encuentran en crecimiento demográfico desde hace unos años. Este crecimiento poblacional invita a pensar que en un futuro la demanda de carne en el departamento de Cochabamba puede aumentar. Debido a la magnitud del matadero municipal de Cochabamba, este incremento de población puede afectar notablemente a la producción y debe ser tenido en cuenta. Un aumento de la demanda de carne obligaría al matadero a tener que procesar un mayor número de reses para tratar de satisfacer la demanda. Esto acarrearía en un aumento del tiempo de faeneo el cual, de no producirse una renovación de maquinaria, repercutirá en un aumento del consumo de electricidad.

En este apartado se tratará de hacer una previsión de este aumento del consumo de electricidad ya que se considera que dicha información será de utilidad para apreciar la viabilidad técnica del sistema de generación por el cual se opte. Para ello se emplearán datos demográficos, los cuales se tratarán de relacionar con la demanda de carne y por tanto con la electricidad que consume el matadero.

### 4.3.1 Datos demográficos departamento de Cochabamba

Se analizan en primer lugar los datos demográficos del departamento de Cochabamba con todos sus municipios y provincias. En la siguiente tabla se muestra la población total del departamento de Cochabamba en los últimos años<sup>8</sup>:

Departamento de Cochabamba	
Año	Población
2005	1671857
2006	1709803
2007	1747901
2008	1786035
2009	1824082
2010	1861918
2011	1899406
2012	1938401 <sup>9</sup>

Tabla 13: Población departamento de Cochabamba (2005-2012). Fuente: Instituto Nacional de Estadística de Bolivia

Este crecimiento también se puede apreciar gráficamente:

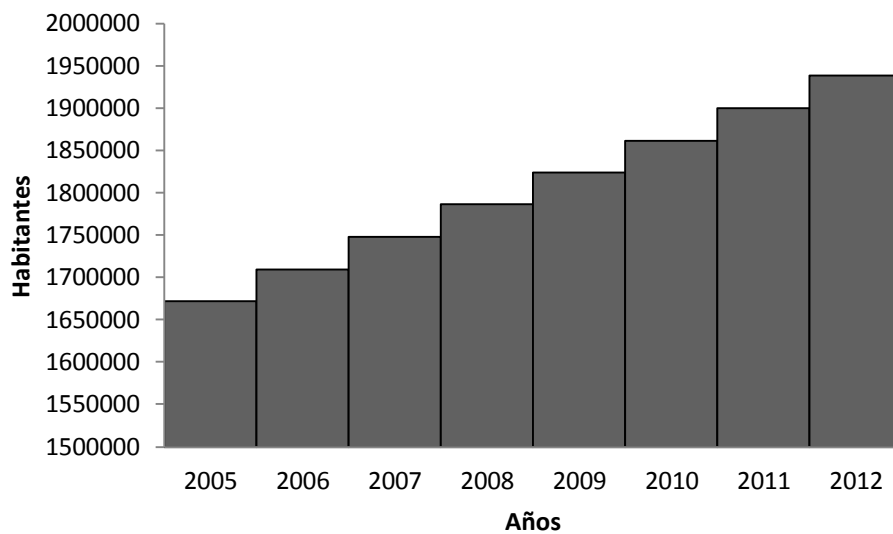


Figura 25: Crecimiento poblacional del Departamento de Cochabamba

En la siguiente tabla se muestra el aumento de la población que ha tenido lugar en el departamento de Cochabamba en los últimos años tanto en número de habitantes como porcentualmente.

<sup>8</sup> Datos extraídos a partir de información demográfica adjunta en el Anexo II.1

<sup>9</sup> Dato extraído del Censo Nacional de Población y Vivienda realizado en 2012 por el Instituto Nacional de Estadística

<b>Departamento de Cochabamba</b>		
<b>Año</b>	<b>Aumento poblacional (Habitantes)</b>	<b>Aumento poblacional (%)</b>
2005-2006	37946	2,27
2006-2007	38098	2,23
2007-2008	38134	2,18
2008-2009	38047	2,13
2009-2010	37836	2,07
2010-2011	37488	2,01
2011-2012	38995	2,05

Tabla 14: Aumento poblacional Departamento de Cochabamba (2005-2012)

Se puede apreciar que el crecimiento poblacional del departamento de Cochabamba se ha mantenido prácticamente constante en torno a un 2% cada año, siendo exactamente el crecimiento promedio de los últimos años de un 2,13%.

#### 4.3.2 Datos demográficos provincia de Cercado (Cochabamba)

Se analizan ahora los datos demográficos de la provincia de Cercado. Dicha provincia es una de las 16 en las que se divide el Departamento de Cochabamba y en la que se encuentra ubicada la ciudad de Cochabamba. Es por tanto la zona a la que distribuye el matadero municipal y la que más debe tenerse en cuenta su aumento poblacional.

En la siguiente tabla se muestra la población total de la provincia de Cercado (Cochabamba) en los últimos años<sup>10</sup>:

<b>Provincia de Cercado (Cochabamba)</b>	
<b>Año</b>	<b>Población</b>
2000	530909
2001	540779
2002	550498
2003	560034
2004	569277
2005	578219
2006	586857
2007	595254
2008	603342
2009	611068
2010	618384
2011	631304

Tabla 15: Población provincia de Cercado (2000-2011). Fuente: Instituto Nacional de Estadística de Bolivia

Este crecimiento también se puede apreciar gráficamente:

<sup>10</sup> Datos extraídos a partir de información demográfica adjunta en los Anexos II.2 y II.3

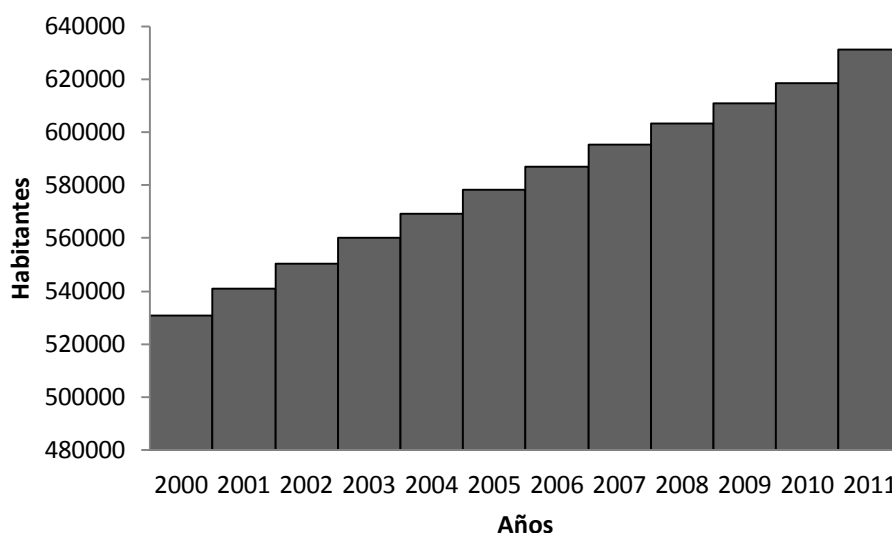


Figura 26: Crecimiento poblacional de la provincia de Cercado (Departamento de Cochabamba)

En la tabla siguiente se muestra el aumento de la población que ha tenido lugar en la provincia de Cercado (Departamento de Cochabamba) en los últimos años tanto en número de habitantes como porcentualmente.

Provincia de Cercado (Cochabamba)		
Año	Aumento poblacional (Habitantes)	Aumento poblacional (%)
2000-2001	9870	1,86
2001-2002	9719	1,8
2002-2003	9536	1,73
2003-2004	9243	1,65
2004-2005	8942	1,57
2005-2006	8638	1,49
2006-2007	8397	1,43
2007-2008	8088	1,36
2008-2009	7726	1,28
2009-2010	7316	1,2
2010-2011	12920	2,1

Tabla 16: Aumento poblacional provincia de Cercado (2000-2011)

Se puede observar que el crecimiento poblacional anual de la provincia de Cercado es algo menor al de su departamento, siendo este un crecimiento promedio de un 1,6%.

### 4.3.3 Estimación de la demanda eléctrica futura

Para estimar la demanda futura que será tenida en cuenta en este proyecto conviene establecer un horizonte temporal para el mismo. El horizonte temporal establece el tiempo para el cual se estima que el proyecto debe cumplir con sus objetivos. Se considera un horizonte temporal para el proyecto de generación de electricidad del

matadero de 10 años. El mismo ha sido establecido teniendo en cuenta que a los gestores les gustaría obtener beneficios en un plazo menor a 10 años y también considerando que el grupo electrógeno tendrá una vida útil que no le permitirá funcionar por mucho más<sup>11</sup>. Al considerar este horizonte temporal para proyecto, interesa estudiar el comportamiento de la demanda de energía eléctrica en el matadero hasta el año 2022.

En los apartados 4.3.1 y 4.3.2 se ha visto que la población del departamento Cochabamba y de la provincia de Cercado aumenta año tras año. Un mayor número de habitantes afectará de manera directa al consumo de carne de res en la región, lo cual llevará al matadero municipal de Cochabamba a aumentar el tiempo de faeneo aumentando con ello el consumo de energía eléctrica de la instalación. Analizando la información que posee el matadero municipal de Cochabamba se buscará una relación entre la cantidad de reses procesadas y el consumo de electricidad.

En la siguiente tabla se muestra el número de reses faenadas en 2012 y durante los primeros meses de 2013 así como la electricidad consumida en dichos meses.

Meses	Faeneo [reses/mes]	Consumo [kWh/mes]
Enero 2012	7541	7540
Febrero 2012	7386	8389
Marzo 2012	8083	7358
Abril 2012	6360	7001
Mayo 2012	7148	8753
Junio 2012	6823	6873
Julio 2012	6372	6388
Agosto 2012	7419	6812
Septiembre 2012	6761	6388
Octubre 2012	6938	5538
Noviembre 2012	7277	7296
Diciembre 2012	8138	5963
Enero 2013	7681	7662
Febrero 2013	6933	8632
Marzo 2013	6717	7540
Abril 2013	5957	5963
Mayo 2013	6132	6206
Junio 2013	6489	6206
Julio 2013	7351	6570
Agosto 2013	7386	7419

Tabla 17: Faeneo y consumo en el matadero municipal de Cochabamba (2012-2013). Fuente: Rada & Asociados

<sup>11</sup> La vida útil de la mayoría de los grupos electrógenos que se encuentran en el mercado ronda las 20000 horas de funcionamiento.

Estos datos representados gráficamente quedan de la siguiente manera:

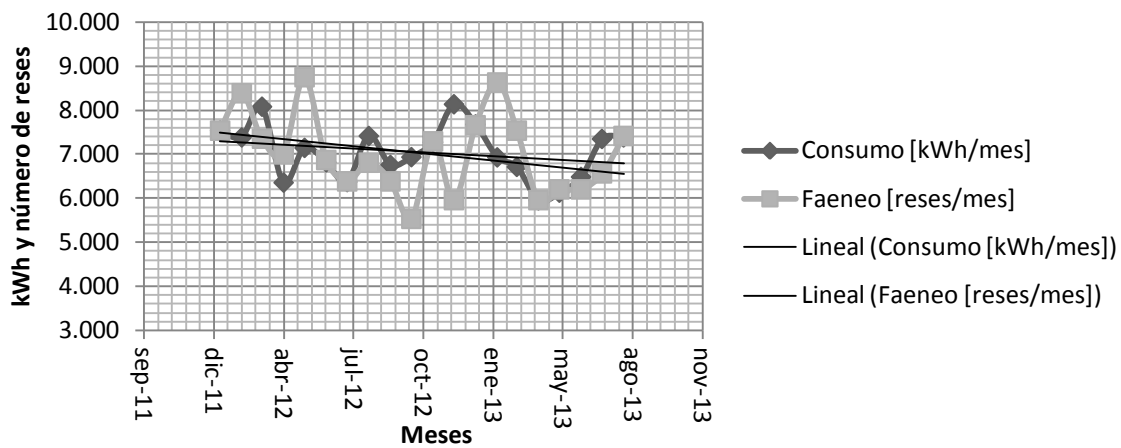


Figura 27: Linealidad entre reses faenadas y energía eléctrica consumida

Esta gráfica permite apreciar cierta relación lineal entre el número de reses faenadas y el consumo de energía eléctrica. Dicha relación lineal se verificó mediante un modelo de correlación lineal<sup>12</sup> incluido en el Anexo III.2 y en donde se justifica la inclusión de los datos de 2013 como una medida para ampliar el tamaño muestral y obtener un resultado más fiable. El asegurar esta relación lineal permite obtener un dato fiable del consumo de energía eléctrica que supone el faeneo de una res:

Meses	[kWh/res]
Enero 2012	1
Febrero 2012	0,88
Marzo 2012	1,1
Abril 2012	0,84
Mayo 2012	0,82
Junio 2012	0,99
Julio 2012	1
Agosto 2012	1,1
Septiembre 2012	1,06
Octubre 2012	1,25
Noviembre 2012	1
Diciembre 2012	0
Enero 2013	1
Febrero 2013	0,8
Marzo 2013	0,89
Abril 2013	1
Mayo 2013	1
Junio 2013	1,05
Julio 2013	1,12
Agosto 2013	1

Tabla 18: kWh por res faenada en los meses de 2012 y principios de 2013

<sup>12</sup> La correlación lineal y sus fundamentos se adjuntan en el Anexo III.1

Como promedio se acepta que el faeneo de una res supone un consumo eléctrico de 1 [kWh]. Se tomará esta estimación como dato para, empleando la previsión de aumento de la demanda de carne, estimar el consumo eléctrico que tendrá lugar en el matadero en los próximos años.

Estableciendo una relación con el aumento poblacional, se proponen tres criterios distintos de aumento de la demanda de carne para predecir el consumo de energía eléctrica:

- Criterio optimista: La demanda de carne de res se incrementa anualmente un 2%. Se considera que el aumento de la demanda de carne de res aumenta anualmente al mismo ritmo que la población del departamento de Cochabamba.
- Criterio realista: La demanda de carne de res se incrementa anualmente un 1,6%. Se considera que el aumento de la demanda de carne de res aumenta anualmente al mismo ritmo que la población de la provincia de Cercado de Cochabamba.
- Criterio pesimista: La demanda de carne de res se incrementa anualmente un 1,2%. Se considera que el aumento poblacional afecta en menor medida a la demanda de carne de res.

Considerando un faenado mensual promedio de 7000 [reses/mes] y bajo la consideración anterior de que el faeneo de una res supone el consumo de 1 [kWh] se realiza un bucle de cálculos<sup>13</sup> que permite obtener las siguientes estimaciones de consumos para los diez años posteriores<sup>14</sup>.

Año	Optimista (2%)	Realista (1,6%)	Pesimista (1,2%)
2013	8893,0	8865,0	8837,0
2014	9035,8	8978,8	8922,0
2015	9181,5	9094,4	9008,0
2016	9330,0	9211,9	9095,1
2017	9481,6	9331,2	9183,2
2018	9636,1	9452,5	9272,4
2019	9793,8	9575,7	9362,6
2020	9954,6	9700,8	9453,9
2021	10118,6	9828,0	9546,3
2022	10286,0	9957,2	9639,8

Tabla 19: Estimaciones de demanda máxima futura [kWh/mes]

<sup>13</sup> Cálculos adjuntos en el Anexo III.3

<sup>14</sup> Horizonte temporal del proyecto.



Este crecimiento puede apreciarse gráficamente:

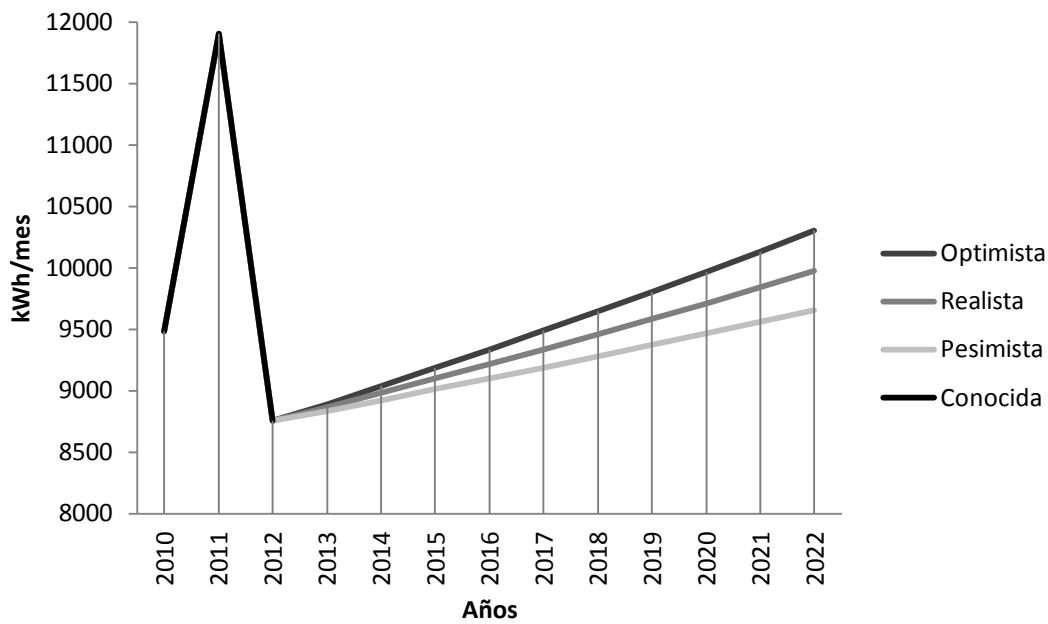


Figura 28: Demanda futura para los tres criterios considerados

Los datos de demanda máxima futura que se obtienen bajo los distintos criterios son los siguientes:

- Criterio optimista: 10301,3 [kWh/mes]
- Criterio realista: 9973,5 [kWh/mes]
- Criterio pesimista: 9655,1 [kWh/mes]

En caso de emplear la demanda estimada futura para llevar a cabo el dimensionamiento del sistema, habrá que optar por un dato sea lo más acertado posible. Con esto se pretende decir que tanto sobredimensionar el sistema generador como infradimensionarlo tiene sus inconvenientes. En caso de optar por una opción baja de demanda futura, el riesgo a que las expectativas sean superadas será mayor. En ese caso puede que el sistema generador no logre cubrir la totalidad de la demanda y se habrá llevado a cabo una mala inversión. Además, un infradimensionado del equipo de combustión puede llevarlo a funcionar sobrecargado, lo cual produce sobrecalentamiento, pérdida de eficiencia y probablemente fallo prematuro con sus costosas consecuencias. Por otro lado, tampoco es conveniente excederse dimensionando al alza ya que, además del coste extra que supone tener que comprar un equipo de combustión de más potencia, dicho equipo trabajaría ineficientemente. La caída en la eficiencia del equipo repercute en un aumento importante del consumo de biogás, que podría no ser suficiente para cubrir la demanda.

Para este proyecto se opta por adoptar una postura prudente entre el criterio optimista y el realista y consideramos que el matadero puede llegar a consumir 10200 [kWh] al mes. Esta postura pretende evitar que el consumo aumente tanto que el sistema generador de electricidad no lo pueda cubrir ya que sustituir el sistema generador implicaría un gasto que el matadero no sería capaz de afrontar. Además, en caso de sobredimensionamiento, podrá permitirse que el motor trabaje con una menor eficiencia si el matadero dispone de biogás de sobra.

Este dato previsto para 2022, año que marca el horizonte temporal del proyecto, se encuentra lejos de lo que se ha llegado a consumir en años anteriores gracias al modelo nuevo de gestión adoptado en noviembre de 2011 y que va a continuar operando como hasta ahora. Además se considera que este consumo mensual se puede alcanzar debido a un aumento en el consumo de la carne que repercutirá en un aumento del tiempo de faeneo. Esto será tenido en cuenta más adelante a la hora de elaborar el modelo de demanda futura.

## 4.4 Demanda de energía térmica

Una vez analizado el consumo de energía eléctrica que tiene lugar en el matadero municipal de Cochabamba se pasa a analizar el consumo de energía térmica que se realiza en el mismo.

En la actualidad y a lo largo de muchos años no ha habido ningún consumo de gas natural por parte del matadero municipal. Actualmente no se cubre ninguna demanda de energía térmica a modo de calefacción. El clima particular de la ciudad de Cochabamba permite que las reses estén en los corrales sin ningún tipo de calefacción. De igual manera, el propio matadero no requiere de calefacción ya que en ninguna estación del año los trabajadores pasan frío en su interior. El único consumo de energía térmica que lleva a cabo el matadero es mediante la incineradora. Dicha incineradora le reporta al matadero unos costes importantes de leña.

Que no halla actualmente ningún consumo de energía térmica destinado a calentar agua no quiere decir que no lo debiera haber. Empleando agua caliente para el lavado y desinfección de la carne aumentaría la higiene del proceso. También, mediante un calentamiento de la sangre, el proceso de tratamiento de las aguas residuales sería medioambientalmente mejor. Es por ello que estas dos aplicaciones que demandan energía térmica pueden ser cubiertas por el biogás generado, mejorando así las prestaciones del matadero y empleando un combustible que se obtendría de manera gratuita. Para cubrir estos procesos se empleará la caldera que se he descrito en el apartado anterior y que es 50

adaptable para la combustión del biogás. De igual manera se estudiará también la posibilidad de sustituir la leña empleada en la incineradora por biogás para ahorrar costes.

#### 4.4.1 Consumo de biogás previsto para la caldera

Las calderas son equipos que, aplicando el calor de un combustible gaseoso, líquido o sólido mediante un quemador especialmente diseñado para combustible, calientan el agua hasta 95°C (calderas de agua caliente), por encima de los 100°C (calderas de agua sobrecalentada), calientan agua y producen su cambio de estado de fase líquida a fase gaseosa (calderas de vapor), o calientan un fluido calorportador diferente al agua (calderas de fluido térmico).

A continuación se identifica la caldera de la que se dispone en el matadero municipal de Cochabamba y se analizarán sus consumos energéticos.

En el matadero cuentan con una caldera de agua caliente. Las calderas de agua caliente son aquellas en las que el fluido calorportador es el agua y tienen una temperatura máxima de servicio inferior a 100 °C. Las calderas con esta tecnología pueden ser de dos tipos diferentes en función de cómo estén dispuestos sus fluidos. Con la que se está tratando en este apartado es de tipo piro-tubular, ya que los gases de la combustión circulan por el interior de unos tubos y el líquido se encuentra en un recipiente atravesado por dichos tubos.



*Figura 29: Caldera piro-tubular de baja temperatura. Fuente: Guía básica de calderas eficientes. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.*

Las especificaciones de dicha caldera vienen indicadas en su correspondiente placa y es la única información acerca de la misma que hay disponible en el matadero:

Equator - Geradora de Agua Quente	
Nº de fabricación	569
Fecha de fabricación	16/05/1991
Capacidad (agua)	1500 L
Salida (agua)	600 L/h
Potencia	60000 kcal/h
Presión máx. de trabajo	6 kg/cm <sup>2</sup>
Combustible	GLP

Tabla 20: Placa de especificaciones de la caldera del matadero municipal de Cochabamba

En caso de habilitar la caldera para su funcionamiento con biogás, se empleará para funcionar diariamente a partir del comienzo de la jornada de trabajo y durante 12 horas ininterrumpidas. Durante este tiempo se requerirá de la misma la potencia indicada por su placa de características. Teniendo en cuenta estas consideraciones, se calcula el biogás que sería necesario para hacer funcionar la caldera. Dichos cálculos, adjuntos en el Anexo IV.3, concluyen que son necesarios 272,6 metros cúbicos diarios de biogás para hacer funcionar la caldera en las condiciones indicadas.

Al ser el biogás un combustible mucho menos energético que el GLP es necesario gastar una mayor cantidad del mismo. Será necesario llevar a cabo modificaciones en la caldera para su funcionamiento con biogás ya que se debe asegurar la combustión y adecuar el caudal para este nuevo combustible.

#### 4.4.2 Consumo de biogás previsto para la incineradora

La incineradora del matadero municipal está destinada a la quema de desechos orgánicos sólidos muy concretos. Se trata de un sistema de tratamiento de residuos que consiste en emplear altas temperaturas para reducir el volumen y el peso de los desechos. Tan solo son incinerados los órganos de las reses que no se pueden comercializar, lo cual reduce la actividad de la incineradora a tan solo 2 o 3 días a la semana. La quema de órganos se realiza mediante el empleo de leña que el matadero se encarga de adquirir.

La energía calorífica que puede liberar la leña es muy variable debido a que es un combustible con una composición incierta. Aunque la leña seca de arboles como el roble o la encina puede llegar a liberar hasta 4500 [kcal/kg], el rango habitual de poder calorífico de la leña oscila entre las 3000 [kcal/kg] y las 4000 [kcal/kg] y será el rango empleado para evaluar el consumo energético de la incineradora.

Con este rango y teniendo en cuenta que cuando se pone en marcha la incineradora se gastan aproximadamente unos 10 kilogramos de leña, se calcula que la demanda de energía térmica de la incineradora es de entre 35 [kWh/día] y 46,5 [kWh/día].

Dicha demanda puede cubrirse con 6,7 [m<sup>3</sup>/día] y con 8,9 [m<sup>3</sup>/día] del biogás del matadero respectivamente. Se tomará como dato que la incineradora puede llegar a gastar 9 metros cúbicos de biogás en un día de funcionamiento. Las operaciones que permiten arrojar esta conclusión se incluyen en el Anexo IV.4.

Considerando el gasto de 9 [m<sup>3</sup>/día] de biogás y teniendo en cuenta que la incineradora opera un máximo de 3 días por semana, el gasto semanal de la incineradora será de aproximadamente 27 m<sup>3</sup>. Dado que no se puede prever que día se va a poner en funcionamiento la incineradora, no se puede asegurar la disponibilidad de esa cantidad de biogás para su empleo en la generación de electricidad. Es por ello que en el dimensionamiento del sistema de generación de electricidad no se contará con el biogás que no es gastado los días que la incineradora no está en funcionamiento.

## 4.5 Conclusiones del análisis de la demanda

A modo de conclusión de este análisis se presenta una tabla con las demandas energéticas del matadero y que se pretenden cubrir empleando biogás.

<b>Demanda máxima actual de energía eléctrica</b>	8753 kWh/mes
<b>Demanda máxima futura de energía eléctrica</b>	10200 kWh/mes
<b>Biogás consumido por la caldera</b>	272,6 m <sup>3</sup> /día
<b>Biogás consumido por la incineradora</b>	9 m <sup>3</sup> /día
<b>Biogás necesario para cubrir la demanda de energía térmica</b>	281,6 m <sup>3</sup> /día

Tabla 21: Conclusiones del análisis de la demanda

Para la realización del proyecto de generación eléctrica se excluirá la fracción de biogás que se ha considerado que será consumida por los procesos térmicos y se empleará tan solo el biogás restante. En los apartados posteriores se estimará la cantidad de biogás que será y se podrán ver las distintas posibilidades de las que dispondrá el matadero para destinar dicha electricidad.

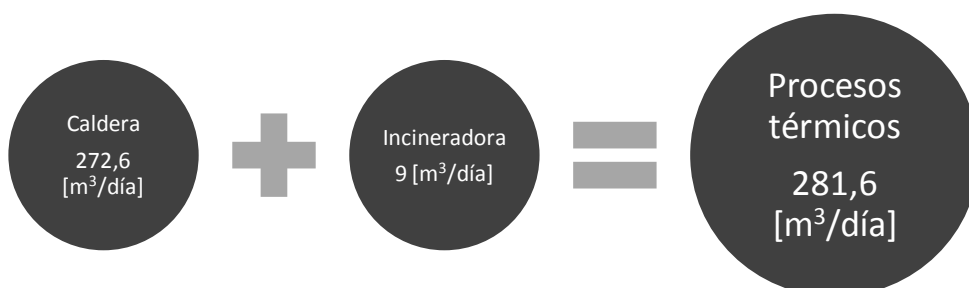


Figura 30: Esquema indicativo del biogás consumido por los procesos térmicos



## 5. Elección del sistema de generación

Antes de dimensionar el sistema de generación de energía eléctrica se debe decidir que necesidades se pretende cubrir con el mismo. Esta decisión es llevada a cabo en este apartado. Para ello se parte del análisis de uno de los parámetros más importantes de la instalación, como es la cantidad de aguas residuales. Su análisis permite estimar el biogás y la electricidad que se puede llegar a generar en el matadero y mostrar el potencial generador del mismo. La apreciación de este potencial hará posible la elección del tipo de sistema generador, la cual se realiza tras una discusión de las distintas alternativas.

### 5.1 Aguas residuales del matadero y biogás generado

La cantidad de aguas residuales es uno de los parámetros más importantes de la instalación ya que va a permitir definir de qué tipo será el sistema generador. Las aguas residuales son la materia prima que permite la generación de energía, ya que mediante el proceso de digestión anaeróbica permiten obtener el biogás. A mayor cantidad de aguas residuales, más biogás se producirá y mayor será el potencial generador del matadero. Conviene recordar que este biogás servirá de combustible para cubrir demandas de energía eléctrica y térmica y que dichas demandas variarán dependiendo del tipo de sistema que se elija.

La siguiente tabla muestra los residuos que genera cada res del matadero.

<b>Línea Verde</b>	30 [kg/res]
<b>Línea Roja</b>	13 [L/res]
<b>Grasas</b>	0,4 [kg/res]
<b>Bosta</b>	1,5 - 4 [kg/res]

Tabla 22: Residuos generados por res en el matadero municipal de Cochabamba. Fuente: Rada & Asociados.

El hecho de que se procesen un promedio de 250 reses diarias permite obtener un caudal de agua residual promedio de 162500 [L/día]. Se va a tener en cuenta el sistema de tratamiento de las aguas residuales que se realiza actualmente en el matadero municipal de Cochabamba para estimar el potencial de generación de biogás que tiene el mismo. Dicho sistema formado por tres biodigestores tratan un total de 1000 litros de agua residual diarios generando un total de 4000 litros de biogás<sup>15</sup>.

<sup>15</sup> Datos proporcionados por J.Martí Herrero en base al seguimiento realizado a los biodigestores del matadero municipal de Cochabamba.

Se aplica directamente esta relación 1 a 4 a la totalidad de las aguas residuales ya que se entiende que tratándolas mediante un sistema tecnológicamente similar instalado en esa misma ubicación no se debe producir una reducción significativa en el biogás generado. Esto se fundamenta en que, la composición de las aguas residuales se mantiene, produciéndose únicamente un aumento en el volumen de las mismas. Con esta consideración se estima el potencial de producción de biogás del matadero municipal de Cochabamba:

Producción de biogás	
Caudal de agua residual [L/día]	162.500
Caudal de biogás [L/día]	650.000
Caudal de biogás [m <sup>3</sup> /día]	650

Tabla 23: Potencial de producción de biogás del matadero municipal de Cochabamba

Anteriormente se analizaron las demandas energéticas del matadero en donde se calcularon los gastos de biogás debidos a las distintas aplicaciones térmicas<sup>16</sup>. Restando dichas demandas se obtiene el biogás disponible para la generación de electricidad:

Usos del biogás producido	
Potencial de generación de biogás [m <sup>3</sup> /día]	650
Biogás destinado a cubrir demanda de energía térmica [m <sup>3</sup> /día]	281,6
Biogás disponible para la generación de electricidad [m <sup>3</sup> /día]	368,4

Tabla 24: Usos del biogás producido en el matadero municipal de Cochabamba

Por tanto se dispone de 368,4 m<sup>3</sup> de biogás sin uso y que se destinan al sistema generador de electricidad. A continuación se realiza una primera estimación que permitirá apreciar el potencial del matadero como organismo generador de electricidad.

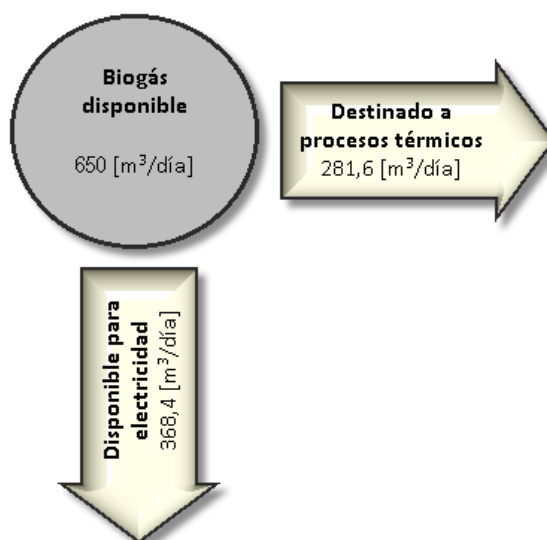


Figura 31: Usos del biogás producido

<sup>16</sup> Vease apartado 4.4



## 5.2 Estimación inicial

Se plantea el caso en el que la totalidad del biogás disponible para generar electricidad se emplea para dicho cometido y se realiza una estimación inicial<sup>17</sup>. Dicha estimación permitirá apreciar el potencial del matadero como generador de energía eléctrica.

El matadero municipal de Cochabamba genera diariamente 650 [m<sup>3</sup>/día] de biogás de los cuales 368,4 [m<sup>3</sup>/día] son destinados a la generación de energía eléctrica. Dicho biogás cuenta con un 55% de metano en su composición. Utilizando un generador con un 25% de eficiencia, diariamente se podrían obtener 479,7 [kWh/día] de energía eléctrica (368,4 [m<sup>3</sup>/día] de biogás x 9,47 [kWh/m<sup>3</sup>] de metano x 55% (v/v) de metano en el biogás x 25% de eficiencia).

Si atendemos al dato estimado de que la demanda eléctrica del matadero puede llegar a ser de 10200 [kWh/mes]<sup>18</sup>, se llega a que en el matadero municipal de Cochabamba se podrán llegar a consumir hasta 392,31 [kWh/día] de energía eléctrica<sup>19</sup>. Como se aprecia, esta demanda de energía diaria puede llegar a cubrirse.

La conclusión que se puede sacar de esta estimación inicial es que la cantidad de aguas residuales que se generan en el matadero producirán una cantidad de biogás que permite cubrir la demanda del mismo. Por tanto, la disponibilidad de biogás no será un limitante a la hora de decidir cuál es la función que debe desempeñar el sistema generador.

## 5.3 Tipos de sistemas generadores de electricidad

Antes de dimensionar un sistema generador de electricidad hay que decidir cuál va a ser la función del mismo. Existen varios tipos de sistemas de generación dependiendo de la función que desempeñan. La siguiente tabla proporciona información de los más habituales:

Tipos de sistemas	Descripción
<b>Sistemas de emergencia obligatorios</b>	Los sistemas de emergencia generalmente se instalan cuando lo exige la seguridad pública y son obligatorios por ley. Generalmente están pensados para proporcionar energía e iluminación por periodos cortos para tres propósitos: permitir una evacuación segura de edificios, para equipo de apoyo a la vida y crítico para gente vulnerable o para sistemas de comunicaciones críticos e instalaciones que aseguran la seguridad pública.

<sup>17</sup> El método empleado para la estimación es el que proporciona la empresa VIOGAZ S.A. a sus clientes potenciales.

<sup>18</sup> Véase apartado 4.3

<sup>19</sup> El matadero se encuentra operativo un promedio de 26 días al mes.

<b>Sistemas de emergencia opcionales</b>	También existen sistemas de emergencia opcionales que la ley no obliga a instalar. Estos sistemas generalmente se instalan en lugares donde la seguridad no está en riesgo, pero la pérdida de energía podría causar una pérdida económica importante. Estos sistemas se instalan en centros de datos, granjas, edificios comerciales e industriales y residencias.
<b>Sistemas para instalaciones aisladas</b>	Son los sistemas empleados cuando no se dispone de red eléctrica que da servicio. Las instalaciones aisladas emplean la generación como sustitución de la energía suministrada por la red pública. Dichos sistemas se componen de al menos dos generadores y un interruptor de transferencia que regula el suministro a las cargas entre ellos. Uno de los conjuntos generadores opera a carga variable mientras el segundo sirve como respaldo en caso de fallo.
<b>Sistemas para cobertura de picos</b>	Las instalaciones para la cobertura de picos utilizan la generación para reducir los picos de demanda de electricidad. La generación se realiza durante el momento de mayor demanda de las instalaciones con el propósito de reducir al máximo los cargos por demanda de electricidad. Los sistemas de cobertura de picos requieren de un controlador que arranque y opere el generador en los momentos que se produzcan los picos de demanda. Los generadores instalados para propósitos de emergencia también pueden usarse para la cobertura de picos.
<b>Sistemas para reducción de tarifa</b>	Las instalaciones destinadas a la reducción de la tarifa emplean la generación para llegar a acuerdos con las distribuidoras de electricidad. A cambio de tarifas favorables, las instalaciones acuerdan generar una cantidad de energía al año, la cual queda a disposición de las distribuidoras. Los convenios acordados dependen de los precios de venta de la electricidad, los cuales varían según de que país se trate. Los generadores instalados para propósitos de emergencia también pueden usarse para la reducción de tarifa.
<b>Sistemas de carga de base continua</b>	Las instalaciones para carga de base continua usan generación para suministrar energía de manera constante, generalmente por medio de un equipo sincronizado con una red de servicio. Este tipo de instalaciones normalmente son propiedad de las distribuidoras o están bajo su control.
<b>Sistemas de cogeneración</b>	Hoy en día, la generación de electricidad se usa a menudo en la aplicación de cogeneración. La cogeneración utiliza tanto la generación de electricidad como el calor de los gases del escape para cubrir las demandas de energía eléctrica y térmica. Las pérdidas de calor del equipo generador pasan a ser consideradas calor útil y es por ello que la eficiencia de los equipos de cogeneración es mayor.

Tabla 25: Descripción de los distintos sistemas de generación de electricidad

De entre dichos sistemas queda descartado el sistema para instalaciones aisladas ya que tanto el matadero como sus alrededores cuentan con suministro por parte de la red eléctrica.

Por otro lado, debido al gran potencial generador del matadero municipal de Cochabamba que se ha apreciado en el apartado 5.2, también se puede descartar la opción de implementar un sistema de emergencia, ya que los mismos solo se emplean ocasionalmente en caso de fallos en la red.

También se puede descartar la opción de un sistema de carga de base continua, ya que otorgaría al matadero el cometido de asegurar el suministro de energía eléctrica a un cliente, el cual es un rol que no le corresponde.

En definitiva, hay tres tipos de sistema que son posibles de implementar y de entre los cuales habrá que elegir el que suponga la mejor alternativa:

- Sistema para cobertura de picos
- Sistema para reducción de tarifa
- Sistema de cogeneración

## 5.4 Discusión de las posibles opciones

En este apartado se profundizará en los tres tipos de sistemas de generación de electricidad que pueden instalarse en el matadero y que son los destinados a cobertura de picos, reducción de tarifa y cogeneración. Se expondrán los objetivos de cada sistema, la demanda que pretenden satisfacer y el marco legal en el que se enmarcan. Esta información permitirá tomar una decisión sobre el tipo de sistema de generación de electricidad a implantar en el matadero.

### 5.4.1 Sistema para cobertura de picos

El objetivo de un sistema para cobertura de picos es suministrar energía a una instalación durante las horas de alta demanda eléctrica. Esta labor puede ser desempeñada trabajando sincronizadamente con la red o de manera aislada, dependiendo esto de si hay suficiente combustible disponible para cubrir la demanda. Para un funcionamiento aislado de la red, estos sistemas contarán con la ventaja añadida de que podrán servir como sistema de emergencia, permitiendo el funcionamiento de las instalaciones en caso un fallo en la red de suministro.

La demanda en un sistema para cobertura de picos viene definida por los picos que se pretenda cubrir. Influirán tanto el tamaño del pico de demanda como su duración. El tamaño del pico es la carga a alimentar y determinará la potencia del generador que se elija. Por su parte, el tiempo que se prolongue el pico definirá el tiempo de operación de dicho generador. En caso de disponer de suficiente biogás para alimentar la carga instalada

el tiempo requerido, estos dos parámetros actuarán como limitantes en el sentido de que no permitirán generar más electricidad a pesar de disponer de biogás para ello.

En cuanto al marco legal, un sistema para cobertura de picos otorgaría al matadero un rol de autoproducer. Según la norma operativa nº 13 del CNDC<sup>20</sup>, un autoproducer es aquella entidad o empresa que produce energía eléctrica para su consumo exclusivo de electricidad, independientemente de su proceso productivo. Dicha norma especifica que si la potencia instalada es igual o mayor a 2 MW, se debe contar con una licencia otorgada por la Autoridad de Fiscalización y Control Social de Electricidad (AE). Para el caso del matadero, cuya potencia instalada es mucho menor<sup>21</sup>, no se requerirá de licencia alguna.

Esto puede comprobarse acudiendo al artículo 25 de la ley de electricidad nº 1604<sup>22</sup>, el cual establece cuales son las actividades de la industria eléctrica que no requieren licencia. Una de las actividades mencionadas en dicho artículo es la producción de electricidad cuyo objetivo sea el autoconsumo o el suministro a terceros, siempre que se realice por debajo de los límites establecidos en los reglamentos. Por su parte, el artículo 4 del Reglamento de Concesiones, Licencias y Licencias Provisionales del CNDC establece los límites en términos de potencia, eximiendo de necesidad de licencia los siguientes casos:

- Generación de electricidad para suministro a terceros con una potencia instalada inferior a 500kW
- Generación de electricidad destinada al uso exclusivo del productor con una potencia instalada inferior a 2MW.

El hecho de no necesitar una licencia para llevar a cabo este proyecto se considera una ventaja ya que, además de evitarse trámites burocráticos, se cuenta con la certeza de que el sistema es viable legalmente.

## 5.4.2 Sistema para reducción de tarifa

El objetivo de un sistema para reducción de tarifa es suministrar energía a la red eléctrica a cambio de una reducción en las facturas eléctricas. Dicha reducción puede ser en forma de descuento en el cobro o en forma de ingreso debido a la venta de energía eléctrica.

---

<sup>20</sup> Comité Nacional de Despacho de Carga. Es el organismo del Estado Plurinacional de Bolivia responsable de garantizar la operación del Sistema Interconectado Nacional (SIN). Coordina las instalaciones de generación y transporte de energía eléctrica para satisfacer la demanda en tiempo real.

<sup>21</sup> Se vio en el apartado 4.1 que el matadero contrata una potencia de 30 kW.

<sup>22</sup> Ley establecida el 21 de diciembre de 1994 la cual define los principios, la organización institucional, la estructura operativa y el modelo económico del sector eléctrico boliviano.

La demanda de un sistema para reducción de tarifa no está definida. Un sistema de este tipo tratará de inyectar a la red lo máximo posible para obtener los mayores ingresos posibles. Esto obligará a elegir un equipo que permita consumir la totalidad del biogás en el periodo de tiempo que se decida inyectar a red.

El marco legal que envuelve la inyección de electricidad en el Sistema Interconectado Nacional no es para nada favorable. La legislación eléctrica boliviana establece dos tipos de actores que pueden inyectar electricidad al SIN y que pueden ser generadores<sup>23</sup> (empresas cuyo negocio es la generación de electricidad para su venta) y autoprodutores (industrias que producen su propia electricidad). Esta distinción afecta a la concesión de tarifas por inyección de energía eléctrica. La norma operativa nº13 de Tratamiento de Excedentes de Energía de Autoprodutores indica que las empresas generadoras ingresan tanto por la energía inyectada al SIN (aprox. 15US\$/MWh) como por potencia servida (aprox. 8US\$/MW-mes), mientras que los autoprodutores solo perciben ingresos por la energía inyectada<sup>24</sup> (aprox. 15US\$/MWh)<sup>25</sup>. Debido a que la remuneración solo por energía es un ingreso muy bajo, actualmente ningún autoprodutor inyecta sus excedentes de electricidad al SIN. Señalar también que el punto 4.5 de la norma operativa nº13 prohíbe a los autoprodutores el retiro de energía y potencia, lo cual imposibilita al sistema de reducción de tarifa de tener una segunda función como sistema de emergencia.

El punto 5 de la norma operativa nº 13 solo permite a los autoprodutores la operación con la red a través de Agentes de Mercado<sup>26</sup>. Convertirse en uno de ellos sería la opción que haría posible un sistema de reducción de tarifa ya que permitiría obtener ingresos tanto por energía como por potencia. Para ello el matadero tendría que crear una empresa dedicada a la generación, la cual deberá atender al artículo 16 de la ley de electricidad, el cual estipula las condiciones que debe cumplir un generador. Esto es lo que hizo la empresa Guabirá Energía, la cual es una empresa dedicada a la generación de energía eléctrica formada paralelamente al Ingenio Azucarero Guabirá. La energía eléctrica generada con los desperdicios del Ingenio Azucarero (Autoprodutor) es vendida por la empresa Guabirá Energía (Generador). Bien es cierto que al ser esta una empresa gubernamental no encontró los obstáculos que podría llegar a encontrar el matadero en caso de que optase por convertirse en generador.

<sup>23</sup> Definidos por la Ley de Electricidad nº1604 como empresas eléctricas que ejercen la actividad de generación.

<sup>24</sup> Punto 4.2 de dicha Norma Operativa.

<sup>25</sup> Datos económicos suministrados por la empresa Guabirá Energía S.A., empresa generadora que actualmente inyecta energía eléctrica al Sistema Interconectado Nacional.

<sup>26</sup> Empresas con potestad de actuar como vendedores y compradores en el mercado de producción de energía eléctrica.

### 5.4.3 Sistema de cogeneración.

Un sistema de cogeneración produce simultáneamente calor y energía eléctrica a partir de un combustible. La cogeneración es una tecnología probada que ofrece numerosos beneficios entre los cuales destacan:

- Aumento en la eficiencia termodinámica del sistema
- Disminución de los costes totales de las instalaciones de consumo de energía
- Mejora de la fiabilidad general de las instalaciones
- Reducción de la demanda de electricidad en la red
- Reducción del consumo de energía de origen (combustible)
- Reducción de las emisiones totales de CO<sub>2</sub>
- Otorga capacidad para emplear biocombustibles

La condición necesaria para que un sistema de cogeneración en planta sea sostenible, además de una necesidad de electricidad, es la necesidad simultánea de calefacción y/o calor de refrigeración. En industrias que funcionan de manera continua la cogeneración es una buena alternativa debido a que la relación entre el calor requerido y la electricidad consumida es alta. Además, en industrias que directamente empleen vapor ó gases de combustión para el desarrollo de sus procesos, la cogeneración se convierte en la alternativa más apropiada. En cuanto a la generación de electricidad, la mayoría de las plantas de cogeneración se encuentran interconectadas a la red eléctrica local y funcionan en paralelo con la misma, lo cual permite la generación de electricidad tanto para el autoconsumo como para venta.

El caso planteado para el matadero municipal de Cochabamba implicaría la cogeneración empleando un motor de combustión interna alternativo. Estos sistemas destacan por ser muy elásticos, permitiendo implementarse con el objetivo de cubrir demandas eléctricas o térmicas. La eficiencia de un motor de combustión destinado a generar electricidad está limitada a la eficiencia eléctrica del mismo<sup>27</sup>. Empleándolo en un ciclo de cogeneración, parte de las pérdidas de calor pasan a considerarse calor útil<sup>28</sup>, incrementándose la eficiencia del sistema hasta valores de en torno al 70-80%. El calor útil empleado para cubrir la demanda térmica de la industria se obtiene de los gases de escape. A diferencia de los ciclos de cogeneración con turbinas de vapor o turbinas de gas, el calor

---

<sup>27</sup> Valor típico de eficiencia eléctrica 32%

<sup>28</sup> Valor típico de calor útil 55%

que se obtiene es de baja temperatura<sup>29</sup>, hecho que limita la demanda térmica que se puede llegar a cubrir.

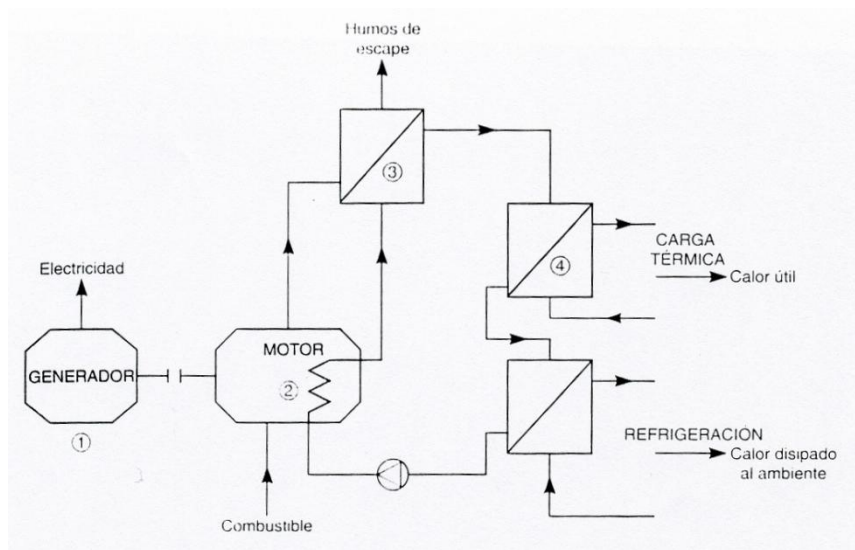


Figura 32: Sistema típico de cogeneración con motor de combustión interna alternativo.

El objetivo de un sistema de cogeneración es generalmente cubrir las demandas de energía térmica, obteniendo además unos ingresos extra debidos a la generación de electricidad e inyección de la misma a la red. En ese caso la demanda vendrá impuesta por los procesos térmicos a cubrir, eligiéndose un equipo que nos permita recuperar el calor requerido por los procesos.

Aunque sea menos habitual, se puede considerar que la demanda a cubrir por el sistema de cogeneración es la demanda de electricidad, lo cual permite plantear tanto el autoconsumo como la inyección a la red. Nos encontraríamos por tanto ante casos similares a los de cobertura de picos y reducción de tarifa, con el añadido de que se aprovecharía el calor residual del equipo de combustión. En cualquier caso, al considerar que la demanda a cubrir es de electricidad, el equipo se dimensionaría para ello y las demandas térmicas no tendrían porque quedar satisfechas.

<sup>29</sup> Valor aproximado de calor de baja temperatura 100°C

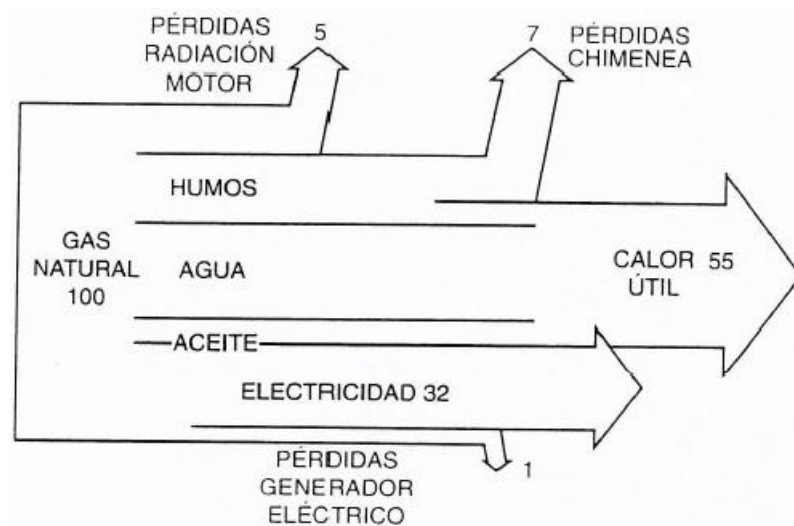


Figura 33: Diagrama Sankey de un motor a gas natural

A diferencia de los países europeos, Bolivia es un país que no cuenta con normativas específicas para regular y fomentar las centrales de cogeneración. Es por ello que el marco legal aplicable a los sistemas de cogeneración es el mismo que el de los sistemas expuestos anteriormente. No se requerirán licencias para el autoconsumo de energía eléctrica en caso de estar por debajo de los límites establecidos por los reglamentos y se encontrarán los mismos problemas a la hora de inyectar a la red.

#### 5.4.4 Resultado de la discusión

Atendiendo a lo expuesto en este apartado sobre los sistemas de cobertura de picos, reducción de tarifa y cogeneración; se concluye que el tipo de sistema más adecuado es el que se emplearía para la cobertura de picos.

El propósito de la generación será por tanto autoabastecer al matadero generando la energía eléctrica que demande el mismo durante las horas del día en las que se produzca mayor consumo. De esta forma se maximizará el ahorro en las facturas eléctricas. Entre las ventajas de emplear un sistema de cobertura de picos se destacan:

- Ahorro económico debido al autoabastecimiento de electricidad.
- Ahorro de energía primaria para el estado debido al autoabastecimiento de electricidad.
- Mayor garantía de suministro. Si hubiese un posible fallo de red la maquinaria podría seguir funcionando.
- Se evitan las dificultades de conexión que acarrearía la interacción con la red para compra-venta de energía eléctrica.



- Se evitan las dificultades legales que acarrearía la interacción con la red para compra-venta de energía eléctrica.

El sistema para cobertura de picos se ha considerado el más adecuado para el caso del matadero, si bien es cierto que existen una serie de desventajas en los otros dos sistemas posibles que han facilitado la elección.

Por un lado, el sistema de cogeneración no se ve nada adecuado para el caso del matadero municipal de Cochabamba debido a que en las instalaciones no existe una demanda térmica la cual deba ser obligatoriamente cubierta. Las demandas térmicas que se han presentado en el apartado 4.4 eran de carácter opcional y que el matadero pretendía afrontar debido a la disponibilidad gratuita de biogás. El sistema que permite recuperar el calor del motor de combustión es muy costoso y su adquisición no se vería compensada por la demanda que se conseguiría cubrir y que sería tan solo la de la caldera de agua caliente<sup>30</sup>.

Por su parte el sistema de reducción de tarifa, si bien es un sistema viable, no se considera adecuado debido a la situación actual del sistema eléctrico boliviano. El marco legal que envuelve la inyección a la red se presenta como un obstáculo complicado de superar, y en caso de lograrlo, el beneficio obtenido por la inyección no es muy alto debido a los bajos precios de compra de energía eléctrica. Además, esta opción implica una mayor inversión inicial debido a que se requiere un equipo de mayor potencia, siendo por tanto un sistema más difícil de rentabilizar.

---

<sup>30</sup> Como se ha apuntado en el apartado 5.4.3, el calor recuperado sería de baja temperatura.



## 6. Dimensionamiento del sistema de generación de electricidad

En este apartado se va a dimensionar el sistema de generación de electricidad, el cual se decidió destinar a la cobertura de picos<sup>31</sup>. Es necesario conocer cuáles son los picos a cubrir, para lo cual se comenzará realizando un estudio a las cargas del matadero que revelará esta información. Los picos de demanda proporcionarán información sobre los parámetros de dimensionamiento que posibilitarán la elección del grupo electrógeno más adecuado para en el sistema de generación de electricidad del matadero.

### 6.1 Estudio de las cargas del matadero

La carga es el factor más importante en un sistema para cobertura de picos. Conocer la magnitud de las cargas y durante cuánto tiempo se prolongan las mismas definirá los picos de demanda que se pretenden cubrir. Los picos definirán la potencia que deberá tener el generador que se elija y las horas de operación del mismo. Debido a esto es importante y necesario llevar a cabo un preciso estudio de las cargas para poder definir los picos de demanda que permitirán dimensionar el equipo. En caso de no disponer de toda la información necesaria de las cargas que se van a alimentar, los primeros cálculos del tamaño del generador se tendrán que basar en estimaciones.

Para conocer la demanda eléctrica del matadero municipal de Cochabamba se dispone tan solo de la información brindada por las facturas eléctricas. Dichas facturas permitieron apreciar en el apartado 4.1 que el matadero contrataba a la compañía eléctrica 30 kilovatios de potencia, consumo que en ocasiones excedía, siéndole entonces tarificados 35 ó 40 kilovatios en función de la cuantía del exceso. Debido a que la información obtenida a partir de las facturas eléctricas se considera insuficiente para llevar a cabo un dimensionamiento correcto del sistema de generación de energía eléctrica, se lleva a cabo un estudio de las cargas del matadero consistente en un seguimiento al contador eléctrico y en un levantamiento de las cargas de la instalación.

#### 6.1.1 Datos del contador eléctrico

Las medidas realizadas en el contador de electricidad ubicado en el matadero proporcionan información fiable del consumo que se lleva a cabo en las instalaciones en las distintas franjas horarias. Como es de esperar, el matadero consume más electricidad

<sup>31</sup> Véase apartado 5.4.4

durante las horas que se realiza el faeneo de las reses debido a los equipos eléctricos que se emplean para esta labor.

Dichas medidas realizadas en el mes de Enero de 2013 permitieron obtener un consumo por cada hora de faeneo de 26,7 kWh y una potencia máxima durante el mismo de 38,4 kW<sup>32</sup>. Dicho dato de potencia máxima debe ser especialmente tenido en cuenta ya que el sistema generador que se elija debe de ser capaz de alimentar a dicha potencia en caso de que se requiera. Un análisis actual de consumos teniendo en cuenta los datos obtenidos a partir del contador proporciona la siguiente información:

<b>Consumos de energía eléctrica (Contador)</b>		
<b>Demanda mensual</b>	7662	[kWh/mes]
<b>Días de operación</b>	26	[días/mes]
<b>Demanda diaria</b>	294,69	[kWh/día]
<hr/>		
<b>Demanda faeneo</b>	26,7	[kWh/h]
<b>Tiempo faeneo</b>	8	[h/día]
<b>Demanda diaria (faeneo)</b>	213,60	[kWh/día]
<b>Demanda diaria (no faeneo)</b>	81,09	[kWh/día]

*Tabla 26: Consumos determinados a partir de medidas al contador eléctrico*

Nótese que se ha tomado como referencia de demanda mensual el mes de enero de 2013 debido a que las medidas realizadas al contador fueron llevadas a cabo en dicho mes<sup>33</sup>. Se aprecia que el 72,5 % de la energía eléctrica se consume durante las 8 horas que dura el faeneo mientras que el 27,5 % restante se consume durante las otras 16 horas del día.

## 6.1.2 Levantamiento de cargas

Para concretar estos datos de consumo energético en un día de operación del matadero se realiza un levantamiento de cargas de las instalaciones. Un levantamiento de cargas permite obtener el consumo de las instalaciones a lo largo del día y se lleva a cabo teniendo en cuenta la potencia demandada por cada una de las maquinas de las instalaciones y la franja horaria en la que operan las mismas.

El levantamiento de cargas realizado en el Anexo V.2, permite elaborar un modelo de demanda del matadero. En él se puede apreciar la demanda de potencia eléctrica de las instalaciones a lo largo de un día. Hay que tener en cuenta que este modelo se ha llevado a cabo tratando de plasmar como sería un día de trabajo intenso en el matadero en el cual la demanda eléctrica es más elevada de lo normal. Esta consideración se fundamenta en que

<sup>32</sup> Información adjunta en Anexo V.1

<sup>33</sup> Los datos de los consumos de los primeros meses de 2013 figuran en el apartado 4.3.3

el equipo que se elija debe estar preparado para abastecer la demanda en caso de que la misma se exceda de la que tiene lugar en un día promedio. El modelo que refleja la demanda eléctrica actual obtenido a partir del levantamiento de cargas queda de la siguiente manera:

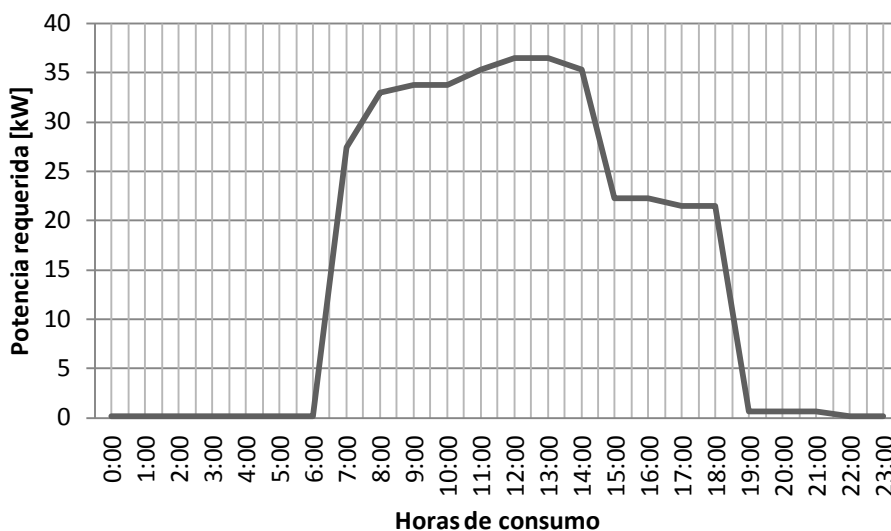


Figura 34: Modelo de demanda eléctrica actual del matadero municipal de Cochabamba

Las conclusiones más relevantes que se pueden extraer del levantamiento de cargas son las siguientes:

- La potencia pico que puede llegar a consumir el matadero municipal es de 36,5 kW alcanzándose durante las horas del faeneo.
- El consumo diario actual del matadero es de aproximadamente 362,8 kWh de los cuales 271,6 kWh (el 74,9%) corresponden a las horas en las que tiene lugar el faeneo.
- El 99% de la energía eléctrica diaria consumida por la instalación se produce durante las 8 horas de faeneo y las 4 horas posteriores al mismo.

Sobre las conclusiones extraídas conviene señalar que la potencia de pico obtenida por medio del levantamiento de cargas es menor a la que se obtuvo mediante el seguimiento al contador eléctrico<sup>34</sup>. El motivo de esto es que la potencia medida por el contador pudo darse de manera transitoria en algún momento del faeneo y quedar registrada en el contador como potencia máxima. Para asegurar el funcionamiento del sistema se tendrá en cuenta que la potencia máxima demandada es la mostrada por el contador ya que es la más elevada de las dos.

<sup>34</sup> Véase apartado 6.1.1 en donde se obtuvo una potencia máxima de 38,4 [kW]

Por otro lado se obtiene un consumo diario de 362,8 [kWh/día], el cual es muy elevado. Como referencia se puede ver que este consumo de energía diario supondría un consumo mensual<sup>35</sup> de 9432,8 [kWh/mes], muy superior a la demanda mensual máxima fijada por el mes de Mayo de 2012 la cual era de 8753 [kWh/mes]<sup>36</sup>. Como fue mencionado anteriormente, esto se debe a que el modelo hallado refleja un día en el que en las instalaciones hay un mayor consumo de electricidad del que suele ser habitual. Esto quiere decir que en alguno de los días del mes de Mayo de 2012 pudo darse una demanda similar, pero que fue algo que no ocurrió en la totalidad de los días del mes.

Por último, se puede apreciar que prácticamente la totalidad de la demanda eléctrica del matadero tiene lugar durante la franja horaria de 7:00 a 19:00. Esto se debe a que el consumo en las doce horas del día restantes es mínimo ya que solo se requiere alumbrado para los encargados de seguridad. Se justifica el elevado consumo una vez finalizado el faeneo debido a las labores de limpieza posteriores y al funcionamiento del sistema de tratamiento de residuos.

Se emplearon los datos del levantamiento de cargas para elaborar un modelo de demanda eléctrica futura<sup>37</sup>. Para ello se tuvo en cuenta el consumo previsto para el matadero en el año 2022 estimado en 10200 kWh<sup>38</sup> y fundamentado en un incremento del tiempo de faeneo. El modelo que refleja la demanda eléctrica futura queda de la siguiente manera:

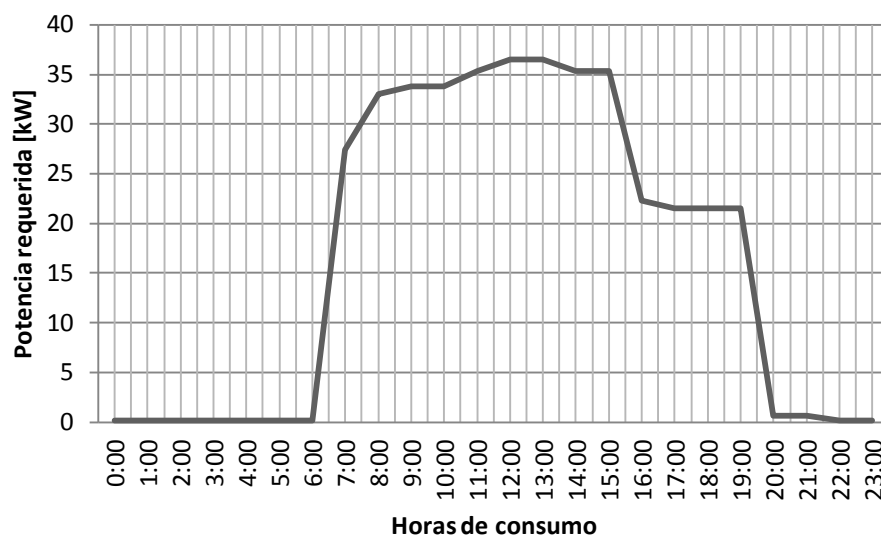


Figura 35: Modelo de demanda eléctrica futura del matadero municipal de Cochabamba

<sup>35</sup> Teniendo en cuenta que el matadero opera un total de 26 días al mes.

<sup>36</sup> Véase apartado 4.2.2

<sup>37</sup> Obtención del modelo de demanda eléctrica futura adjunta en Anexo V.3

<sup>38</sup> Estimación realizada en el apartado 4.3.3

Como se puede apreciar, en el modelo de demanda eléctrica futura el tiempo de faeneo se incrementa una hora y esto acarrea que se pospongan una hora las labores de limpieza y tratamiento de residuos. Entre las conclusiones obtenidas se puede destacar la reducción del porcentaje de consumo en la franja horaria de 7:00 a 19:00, la cual pasa a suponer un 93,8% del consumo diario de energía eléctrica cuando en el modelo de demanda actual suponía un 99%. Esto ocurre porque, al incrementarse el faeneo, una de las horas en las que se realiza la limpieza y el tratamiento de los residuos queda fuera de dicha franja.

## 6.2 Parámetros de dimensionamiento

El estudio de las cargas del matadero realizado en el apartado anterior permite visualizar gráficamente los picos de demanda a cubrir. Empleando esta información se definirán los parámetros que permitirán dimensionar el sistema de generación de electricidad. Para el caso de un sistema de generación de electricidad destinado a cubrir picos de demanda eléctrica dichos parámetros son la carga instalada y las horas de funcionamiento.

### 6.2.1 Carga instalada

Las conclusiones obtenidas en el estudio realizado a las cargas del matadero en el apartado 6.1 se pueden resumir en los siguientes puntos:

- El pico máximo de potencia ocurre durante el faeneo y puede alcanzar los 38,4 kW<sup>39</sup>.
- La carga del matadero se mantiene a lo largo del faeneo en torno a un valor promedio de 34 kW.
- La carga se reduce tras el faeneo hasta una potencia promedio de 21,9 kW y es debida a los equipos encargados del tratamiento de residuos.
- Tras finalizarse las actividades en el matadero la carga a alimentar es mínima debido a que tan solo hay consumo debido a la iluminación.

Teniendo en cuenta esta información se concluye que el grupo electrógeno que se elija deberá tener la potencia suficiente para alimentar la carga que tiene lugar durante el faeneo. Es la mejor decisión ya que cubriendo el pico donde mayor es el consumo se maximizará el ahorro en las facturas eléctricas. Se tratará de elegir un equipo que trabaje de forma óptima cuando tenga que alimentar a las cargas que tienen lugar durante el faeneo.

<sup>39</sup> Dato registrado por el contador eléctrico obtenido en el apartado 6.1.1

Elegir el equipo de combustión para que trabaje óptimamente durante el faeneo dificultará su trabajo en el resto de franjas horarias. La reducción de la carga que tiene lugar tras el faeneo llevará al equipo a trabajar de manera ineficiente (Quedará sobredimensionado para esa franja horaria). Tras la elección del equipo de combustión será necesario ver como trabajaría el mismo tras esta reducción de la carga para saber si se debe hacer funcionar al mismo tan solo durante el faeneo o también durante las horas posteriores al mismo.

Se descarta que el equipo funcione tras el cese de actividades en el matadero debido a que la carga a cubrir es demasiado pequeña. El equipo de combustión elegido para poder suministrar la potencia que tiene lugar en el faeneo sería demasiado grande para suministrar únicamente potencia para iluminación.

## 6.2.2 Horas de operación

Las horas de funcionamiento del matadero fueron expuestas en el apartado 3.2. Allí se vio que el faeneo de las reses duraba un promedio de 8 horas diarias, desde las 7:00 a 15:00, siendo esta franja horaria la de mayor consumo de energía eléctrica. Las horas durante las que operará el sistema de generación de electricidad se apoyan en la información extraída en el levantamiento de cargas y que permitió apreciar los picos de demanda de las instalaciones. En base a esto:

- El grupo electrógeno que se elija funcionará como máximo durante 12 horas diarias. Se hará esto para prevenir el deterioro del equipo<sup>40</sup>.
- Para maximizar el ahorro en las facturas eléctricas, se priorizará cubrir la demanda de energía eléctrica que supone el faeneo, por lo que el generador comenzará a funcionar a las 7:00 AM.
- La generación de electricidad continuará tras el faeneo siempre y cuando el equipo sea capaz de afrontar la reducción de la carga que tiene lugar tras el mismo. Esto deberá ser estudiado mediante una caracterización al grupo electrógeno que elija.
- El cese de las actividades del matadero marcará el fin de la operación del sistema de generación ya que el mismo no estará preparado para cubrir las cargas pequeñas debidas a la iluminación.

Se concluye que en un día de trabajo del matadero<sup>41</sup> el sistema generador de electricidad funcionará como máximo en la franja horaria de 7:00 AM a 19:00 PM (12

---

<sup>40</sup> Recomendación realizada por la compañía Aqualimpia Engineering, la cual vende grupos electrógenos a biogás



horas) y comprenderá las 8 horas promedio que dura el faeneo y las 4 horas posteriores al mismo. Dado que el grupo electrógeno será elegido para trabajar de manera óptima durante el faeneo, queda en el aire que el mismo pueda funcionar tras el mismo y deberá ser objeto de estudio. En caso de que no pueda hacerlo el grupo electrógeno solo funcionará durante las 8 horas de faeneo ya que se descarta la posibilidad de adquirir un nuevo grupo electrógeno para esta franja horaria.

### 6.3 Cálculo de la potencia del grupo electrógeno

En el apartado 5 se tuvieron en cuenta los residuos generados en el matadero para realizar una estimación del biogás que se puede llegar a generar y definir el tipo de sistema que se va a implementar en el matadero. De esta forma se llegó a la conclusión de que el sistema de generación de electricidad más adecuado era aquel destinado a la cobertura de picos. Los picos de demanda a cubrir fueron definidos mediante el estudio realizado a las cargas del matadero en el apartado 6.1, los cuales permitieron fijar los parámetros de dimensionamiento en el apartado 6.2. Así pues, con la información obtenida a lo largo de este proceso se puede determinar la potencia que debe suministrar el grupo electrógeno que conformará el sistema generador para cobertura de picos.

En ese aspecto, la información obtenida a partir del contador eléctrico y mediante la realización del levantamiento de cargas permitió definir el parámetro de la carga, el cual es el que se va a tener en cuenta para elegir que la potencia del grupo electrógeno. En base a esto se determina que la potencia que debe aportar el grupo electrógeno debe ser de 38,5 kW.

### 6.4 Sobredimensionamiento por altitud

Que la presión atmosférica decrece exponencialmente con la altitud<sup>42</sup> es un hecho debido a que la masa de aire soportada es menor cuanto mayor es la altura. Por otro lado, al ser el aire un fluido compresible, un decrecimiento de la presión hará que la masa de aire se expanda, aumentando su volumen y reduciéndose su densidad. Este hecho hace de la presión atmosférica una propiedad clave para considerar el efecto de la altitud en los sistemas que emplean fluidos térmicos.

Cochabamba se encuentra a 2570 m.s.n.m. y esto afectará a la potencia del motor elegido. Como se ha expuesto, a mayor altura, menor es la presión y el aire tiene menor densidad. Esta reducción de densidad afecta a la reacción de combustión que tiene lugar en

<sup>41</sup> Se toma como referencia el día definido por el levantamiento de cargas en el apartado 6.1

<sup>42</sup> Véase Anexo V.4

los motores térmicos debido a que el aumento del volumen del aire hará que la proporción de oxígeno en el mismo sea menor. En la relación estequiométrica de combustión, al reducir el valor del oxígeno, se reduce el valor del combustible a reaccionar con dicho oxígeno. Dicho de otra forma, la reducción de la presión atmosférica hace que para un mismo volumen de aire haya menos cantidad de oxígeno, por lo que la mezcla aire/biogás es peor, de menor riqueza y homogeneidad. El resultado de esto es que el motor generará menos par motor y por tanto menos potencia.

Parece lógico pensar que en los equipos de combustión, si la alimentación de combustible se mantiene constante y el equipo está ubicado en altitud, la relación aire-combustible bajará. En realidad los fabricantes diseñan los equipos para que la relación aire-combustible se mantenga constante. De esta forma se evitan los problemas que acarrea la combustión incompleta como la caída de la eficiencia y la disminución de la vida útil del equipo. Por tanto, si la cantidad de aire disponible para la combustión decrece con la altitud, la cantidad de combustible que reacciona con ese oxígeno decrece en la misma proporción haciendo que el motor brinde menos potencia a la salida. La solución a esto es sobredimensionar el motor para que la cantidad de mezcla admitida sea mayor.

Normalmente los motores se fabrican para funcionar en sus condiciones normales en alturas de hasta 1000 m.s.n.m. por lo que para dimensionar el motor en instalaciones de mucha altitud como el matadero municipal de Cochabamba se realizará un sobredimensionado del mismo. Este sobredimensionado considerará la limitación de la potencia debida a la altura de forma que permita obtener a la salida la potencia requerida. El inconveniente principal de este sobredimensionado, aparte del aumento del coste que supone un equipo de mayor potencia, es que será necesario gastar más combustible para obtener la misma potencia a la salida.

Para equipos de combustión, una buena aproximación para estimar la reducción de potencia con la altura es tener en cuenta la reducción que sufre la densidad del aire con la misma. Se considera el factor de variación de densidad como una aproximación de la pérdida de potencia del motor<sup>43</sup>. En el Anexo V.5 se calcula el factor de variación de densidad  $\xi(z)$  para la altura de 2570 m.s.n.m. y se deduce que la potencia que ofrecerá el equipo trabajando en altura se reducirá un 27%. Esto implica que el equipo que se elija estará limitado a entregar un máximo del 73% de su potencia nominal.

---

<sup>43</sup> Consideración basada en el artículo "Design considerations for combined cooling, heating, and power systems at altitude" de Nelson Fumo, Pedro J. Mago y Kenneth Jacobs.

Se emplea esta información para determinar la potencia nominal del motor que nos permitirá obtener 38,5 kilovatios de potencia a la salida, concluyéndose que el equipo necesario será de 52,74 kilovatios. Por tanto, el equipo de combustión por el cual se opte deberá tener una potencia nominal cercana a los 53 kW.

## 6.5 Elección del grupo electrógeno

En el apartado 2.3.5 se concluyó que la tecnología más adecuada para la generación de electricidad en el matadero es la que emplea un grupo electrógeno a biogás. Para elegir correctamente un grupo electrógeno hay que tener en cuenta una serie de factores:

- Por un lado la potencia que se necesita obtener del mismo. Para ello hay que tener en cuenta la potencia de todos los aparatos eléctricos que puedan funcionar a la vez así como las condiciones atmosféricas, la temperatura ambiental y la altitud. En el caso del matadero municipal de Cochabamba se ha determinado que la potencia que se necesita obtener es de 38,5 kW y que debido a la altura el equipo que nos va a permitir obtener esa potencia a la salida debe tener 53 kW de potencia nominal.
- Por otro lado el tipo de trabajo que va a realizar el grupo electrógeno. Hay que conocer si el grupo electrógeno va a tener una alta carga de trabajo (6-12 ó más horas al día durante varios días o meses) ó si es para servicio de emergencia. Se ha decidido que el motor del matadero tendrá un funcionamiento de 12 horas diarias correspondientes al faeneo y las horas posteriores al mismo (de 7:00 a 19:00). Esto implica que el grupo electrógeno que se escoja para el matadero municipal estará sometido a una alta carga de trabajo y habrá que tenerlo en cuenta para las labores de mantenimiento.

En base a lo anterior el grupo electrógeno a biogás elegido corresponde al modelo AQL69 de la compañía Aqualimpia cuya potencia nominal es de 55 [kW]. Se adjuntan las especificaciones de este modelo incluyéndose el catálogo completo de los grupos electrógenos AQL en el Anexo V.6:

GENERADOR AQL GENSET – MODELO AQL69		
<b>ESPECIFICACIONES</b>		
Potencia Standby	69/55	kVA/kWe
Potencia Primaria	63/50	kVA/kWe
Potencia Continua	50/40	kVA/kWe
Frecuencia	60	Hz
Tensión nominal	220	V
Corriente nominal	90,2	A
Factor de potencia	0,8	cos $\phi$
<b>MOTOR</b>		
Marca	Cummins brand-new gas engine	
Modelo	R-6BTA	
Desplazamiento	5,9	L
Velocidad	1800	rpm
Ratio de compresión	10:1	
Diámetro*Carrera	102*120	mm*mm
Refrigeración	Agua	
Capacidad de aceite	14,2	L
Refrigeración de aceite	Incluida	
Mezclador	IMPCO, USA	
Sistema de ignición	Made in Canada	
Controlador de velocidad	WOODWARD	
Filtro de biogás	KromSchroeder, Germany	
Reductor de presión (opcional)	Fiorentini, Italy	
<b>ALTERNADOR</b>		
Marca	Leroy Somer	
Fases	3	
Método de conexión	SAE standard	
Modo de excitación	Autoexcitado sin escobillas	
Grado de aislamiento	H	
<b>OTROS DATOS</b>		
Tipo de controlador	SmartGen Digital Controller	
Display	LCD	
Combustible	Biogás	
Presión del gas a la entrada	1 - 5,5	kPa
Dimensiones	2280*1050*1500	mm*mm*mm
Peso neto	1000	kg
Recinto insonorizado	Opcional	
Nivel de protección	IP23	
Periodo de garantía	4000	h
Consumo de biogás	0,58	m <sup>3</sup> /kWh
Eficiencia eléctrica ( $\pm 2\%$ )	33	%
Eficiencia térmica ( $\pm 2\%$ )	52	%
Eficiencia total ( $\pm 2\%$ )	85	%

<b>PRECIOS</b>		
<b>FOB Germany</b>	24.640,00	US\$
<b>con ATS (opcional)</b>	1.260,80	US\$
<b>con sistema de recuperación de calor (opcional)</b>	8.448,00	US\$
<b>con cubierta insonorizada (opcional)</b>	3.520,00	US\$
<b>con sincronización a la red (opcional)</b>	8.000,00	US\$

Tabla 27: Especificaciones del grupo electrógeno elegido



## 7. Caracterización del funcionamiento del grupo electrógeno

En este apartado se estudiará el comportamiento del grupo electrógeno que se ha elegido para autoabastecer de energía eléctrica al matadero municipal de Cochabamba.

Se comenzará definiendo el modo de funcionamiento del grupo electrógeno en términos de potencia, para lo cual se indicará el rango de potencia de trabajo. Posteriormente se determinarán los parámetros de trabajo del equipo, los cuales son la carga y la eficiencia. Para ello se partirá de la información extraída en el estudio de las cargas del matadero realizado en el apartado 6.1. Los parámetros obtenidos se emplearán para determinar el combustible consumido por el grupo electrógeno y la electricidad que es capaz de generar. Esto permitirá concluir la caracterización del equipo realizando unos balances de combustible y de electricidad generada que desvelarán la viabilidad técnica del sistema.

### 7.1 Definición del trabajo del grupo electrógeno

Antes de calcular los parámetros que permitirán determinar la viabilidad técnica del sistema conviene definir como trabajará el grupo electrógeno. La elección del grupo electrógeno fue orientada a cubrir la demanda que tiene lugar durante el faeneo, por lo que conviene comprobar si el mismo es capaz de alimentar a las cargas del matadero cuando estas se reducen<sup>44</sup>. En este apartado se comenzará asignando el modo de trabajo del grupo electrógeno en términos de potencia para posteriormente analizar si el mismo puede alimentar de manera adecuada a las cargas que se le pretende asignar.

#### 7.1.1 Modo de funcionamiento

El modo de funcionar que tendrá el grupo electrógeno elegido dependerá del rango de potencia en el que trabaje. Los rangos de potencia de los grupos electrógenos son publicados por los fabricantes y describen sus condiciones de carga permisible. Cada grupo electrógeno puede funcionar dentro de unos rangos de potencia, los cuales deben ser tenidos en cuenta para garantizar un correcto funcionamiento y una larga vida útil. De igual manera, se recomienda que el generador opere con una carga mínima que le permita lograr temperaturas normales de trabajo y quemar el combustible correctamente. La mayoría de

<sup>44</sup> En el apartado 6.1.2 se apreció una reducción de la carga tras el faeneo

los fabricantes recomiendan que un generador opere a un mínimo de 30% de su rango de potencia.

Los rangos de potencia que emplean la mayoría de los fabricantes, incluido los del grupo electrógeno que se ha seleccionado, son los rangos de potencia standby, primaria y continua. La descripción de dichos rangos, adjunta en el Anexo VI.1, permite conocer lo siguiente:

- Un equipo generador usado en aplicaciones standby servirá como un respaldo para la fuente de energía primaria (red) y se espera que no se use frecuentemente, por lo que la potencia standby es la potencia más alta disponible para el conjunto generador. En el caso del grupo electrógeno AQL69 se dispone de una potencia standby de 55 kW tal y como indican sus especificaciones.
- Los equipos que funcionen en su rango de potencia primaria se espera que operen durante horas ilimitadas y se consideran adecuados para trabajar con cargas variables. La potencia primaria es generalmente cercana al 90% de la capacidad standby. En el caso del grupo electrógeno AQL69 se dispone de una potencia primaria de 50 kW tal y como indican sus especificaciones.
- En las aplicaciones con rango de potencia continua, se espera que el conjunto produzca la potencia de salida por horas ilimitadas a carga constante (aplicaciones en las que el conjunto puede operarse en paralelo con la red). La potencia continua es generalmente cerca del 70% de la potencia standby. En el caso del grupo electrógeno AQL69 se dispone de una potencia continua de 40 kW tal y como indican sus especificaciones.

		Standby(kVA)	69
Item		Model	AQL69
Spec.	standby power	kVA/kWe	69/55
	prime power	kVA/kWe	63/50
	continous power	kVA/kWe	50/40

Figura 36: Detalle de las especificaciones del grupo electrógeno elegido. Fuente: AQL Engineering



Para el caso del matadero municipal de Cochabamba, el rango de potencia en el que va a trabajar el grupo electrógeno es el rango de potencia primaria debido a que:

- Las cargas del matadero que deberá alimentar el generador son variables.
- El tiempo de operación del generador será de entre 8 y 12 horas diarias, lo cual requiere de un rango de potencia que permita alimentar durante una gran cantidad de horas anuales.
- El sistema que se ha definido es para cobertura de picos y en dichos sistemas se emplea prioritariamente este rango.

	Potencia del equipo generador		
	Standby	Primaria	Continua
Tipo de sistema	Emergencia legalmente exigido	Instalaciones aisladas	Carga base continua
	Emergencia opcional	Cobertura de picos	Cogeneración
		Reducción de tarifa	

Tabla 28: Tipos de sistema y sus rangos de potencia recomendados. Fuente: Manual de Aplicación para Conjuntos Generadores enfriados con Líquidom, Cummins Power Generation

En la siguiente tabla se define el rango de potencia primaria para el grupo electrógeno AQL69 que se ha elegido:

Rango de potencia primaria	
Potencia primaria (100%)	50 kW
Potencia mínima recomendada (30%)	15 kW
Potencia de sobrecarga máx. (110%)	55 kW
Potencia promedio máx. permisible (70%)	35 kW

Tabla 29: Rango de potencia del grupo electrógeno seleccionado

Para un correcto funcionamiento, el sistema deberá operar por debajo de la potencia promedio máxima permisible la mayor parte del tiempo. Además la potencia de sobrecarga máxima solo podrá alcanzarse excepcionalmente ya que un funcionamiento en este punto durante más de 25 horas anuales acortará la vida útil del grupo electrógeno.

### 7.1.2 Análisis de las cargas y tiempos de trabajo

Se analizan las cargas y tiempos de trabajo para comprobar que el sistema funciona correctamente en el rango de potencia primaria. Para dicho rango se debe comprobar que el sistema opera por debajo de la potencia promedio máxima permisible y que no se alcanza la potencia de sobrecarga máxima, o que si lo hace solo sea de manera excepcional.

El problema de la altura limita el equipo de tal manera que como máximo trabajará al 73% de su potencia nominal<sup>45</sup> alimentando en ese punto 40 kilovatios de potencia. En

<sup>45</sup> Ver apartado 6.4 en el cual se estimaron las pérdidas debidas a la altitud en un 27%

cualquier caso el equipo logrará entregar la energía requerida por las cargas del matadero ya que se ha sobredimensionado para ello. Se emplea un equipo de mayor potencia que si se trabajase a menor altitud, pero esto otorga la ventaja de saber que el grupo electrógeno nunca alcanzará la potencia de sobrecarga máxima.

Por otro lado, el generador será capaz de trabajar por encima de la potencia promedio máxima permisible de 35 kilovatios. Esta potencia no deberá ser sobrepasada durante un número prolongado de horas para evitar el deterioro del equipo.

Se emplea la información que se obtuvo en el levantamiento de cargas realizado a las instalaciones del matadero en el apartado 6.1.2. Dichos datos se muestran en la siguiente gráfica:

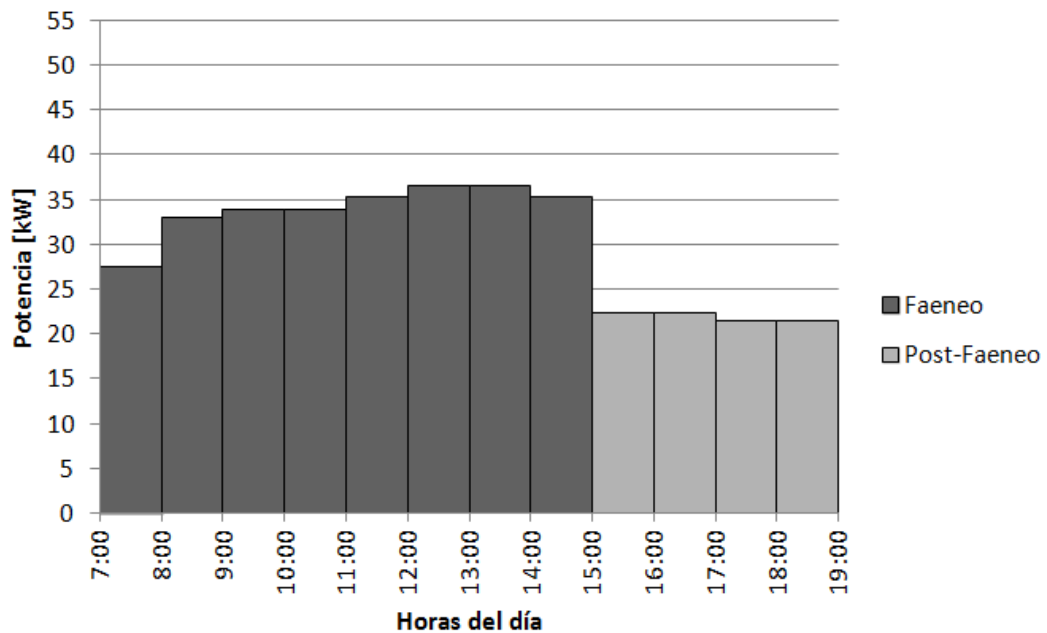


Figura 37: Cargas del matadero municipal de Cochabamba (Franja horaria 7:00 - 19:00)

Se aprecia una diferencia clara entre la carga que debe alimentar el generador durante el faeneo y tras el mismo. Se designará como “Post-Faeneo” a la franja horaria que tiene lugar tras el faeneo en la cual la potencia eléctrica requerida por el matadero se reduce. El post-faeneo se alargará por cuatro horas tal y como se ha considerado para un día actual de trabajo del matadero.

A continuación se agrupan las cargas en tiempos de una y dos horas y se disponen frente al rango de potencia primaria para tener una idea más clara del comportamiento del grupo electrógeno:

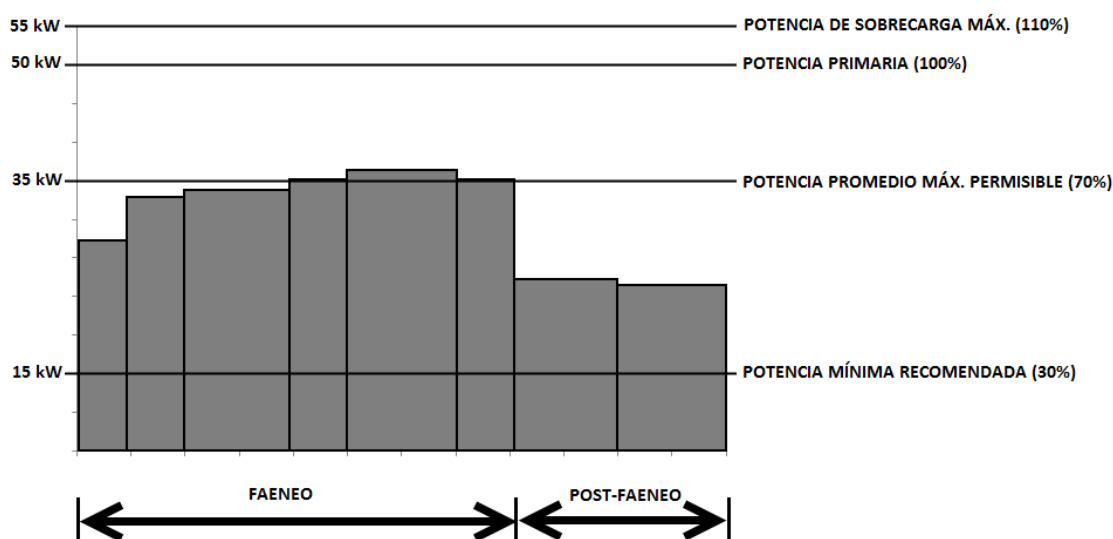


Figura 38: Cargas agrupadas frente al rango de potencia del generador

Esta gráfica nos permite sacar las siguientes conclusiones:

- El grupo eléctrico no llegará ningún momento a la potencia de sobrecarga máxima desaconsejada por el fabricante para el rango de potencia primaria. Esto ya se había previsto debido al sobredimensionamiento por altitud realizado durante la elección del equipo de combustión.
- El grupo eléctrico no trabajará nunca por debajo de la mínima potencia recomendada. Esto se logra debido a que al establecer las horas de operación del grupo eléctrico<sup>46</sup> ya fueron excluidas las horas en las que la demanda es mínima.
- El grupo eléctrico podrá trabajar suministrando a las cargas que tienen lugar en el post-faeneo. Esto se debe a que las mismas se encuentran por encima de la potencia mínima recomendada en un punto en el que el equipo puede trabajar. Dado que el grupo eléctrico ha sido dimensionado para trabajar lo más óptimamente posible durante el faeneo, será necesario analizar su trabajo en las horas posteriores al mismo.
- El grupo eléctrico trabajará por encima de la potencia promedio máxima durante tres horas en un día normal de funcionamiento. Tres horas no se considera un funcionamiento prolongado, por lo que no se aprecia un riesgo del equipo. Además dicha potencia se excede de manera mínima, por lo que no se puede considerar un problema.

<sup>46</sup> Véase apartado 6.2.2

En base a lo expuesto, se considera para el posterior estudio que el grupo electrógeno funcionará de manera correcta dentro del rango de potencia primaria y su franja horaria de trabajo será de 12 horas desde que se inicia el faeneo hasta que cesa la actividad en el matadero (7:00 - 19:00).

## 7.2 Determinación de los parámetros de trabajo del grupo electrógeno

Una vez visto que el grupo electrógeno es adecuado para la franja horaria que se le va a imponer, se estimarán sus principales parámetros de trabajo con el fin de apreciar un comportamiento que garantice su viabilidad técnica. En primer lugar se estimará la carga de trabajo a la que se someterá al generador en su franja horaria de funcionamiento. Dicha carga es diferente durante el faeneo y tras el mismo debido a la diferencia de requerimientos de potencia entre ambas situaciones de trabajo. También se estimarán las eficiencias de trabajo, las cuales dependen a su vez de las cargas de trabajo. La obtención de estos parámetros permitirá obtener la electricidad generada y el biogás consumido para ello por el equipo, quedando de esta forma caracterizado el funcionamiento del mismo a lo largo de sus doce horas de funcionamiento.

### 7.2.1 Carga de trabajo

El grupo electrógeno trabajará de dos formas claramente diferentes durante el faeneo y tras el mismo debido a la diferencia entre requerimientos de potencia de las instalaciones. La potencia requerida en ambas situaciones se puede calcular empleando la expresión de la potencia promedio, la cual viene dada por:

$$\text{Potencia Promedio} = \bar{P} = \frac{(P_1 \cdot T_1) + (P_2 \cdot T_2) + (P_3 \cdot T_3) + \dots + (P_n \cdot T_n)}{T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_n}$$

Se calcula por tanto la potencia promedio que tiene lugar en las 8 horas de faeneo y en las 4 horas de post-faeneo.

$$\bar{P}_{\text{faeneo}} = \frac{(27,4) + (33) + (33,8 \cdot 2) + (35,3) + (36,5 \cdot 2) + (35,3)}{1 + 1 + 2 + 1 + 2 + 1} = 34 \text{ kW}$$

$$\bar{P}_{\text{post-faeneo}} = \frac{(22,3 \cdot 2) + (21,5 \cdot 2)}{2 + 2} = 21,9 \text{ kW} \approx 22 \text{ kW}$$

Empleando estos cálculos, las cargas se pueden agrupar en dos bloques. La que tiene lugar en el faeneo, que será de 34 kW y que se extenderá por un tiempo de 8 horas, y la que tiene lugar tras el faeneo, que será de 22 kW y se extenderá por un tiempo de 4 horas. Esta simplificación se puede considerar válida para caracterizar la operación del

equipo generador debido a que en ambas situaciones no hay una gran desviación con respecto a la potencia promedio.

La gráfica siguiente muestra las cargas agrupadas en dos grandes bloques, designados como faeneo y post-faeneo, y cuyo valor corresponde a sus respectivas potencias promedio. Además estas cargas se han dispuesto frente al rango de potencia primaria, el cual se consideró el rango de potencia de trabajo del grupo eléctrico<sup>47</sup>. Esto permite apreciar que tras agrupar las cargas, el grupo eléctrico continúa cumpliendo con los requisitos de funcionamiento del rango de potencia primaria, los cuales ya se apreció que cumplía en el apartado 7.1.2.

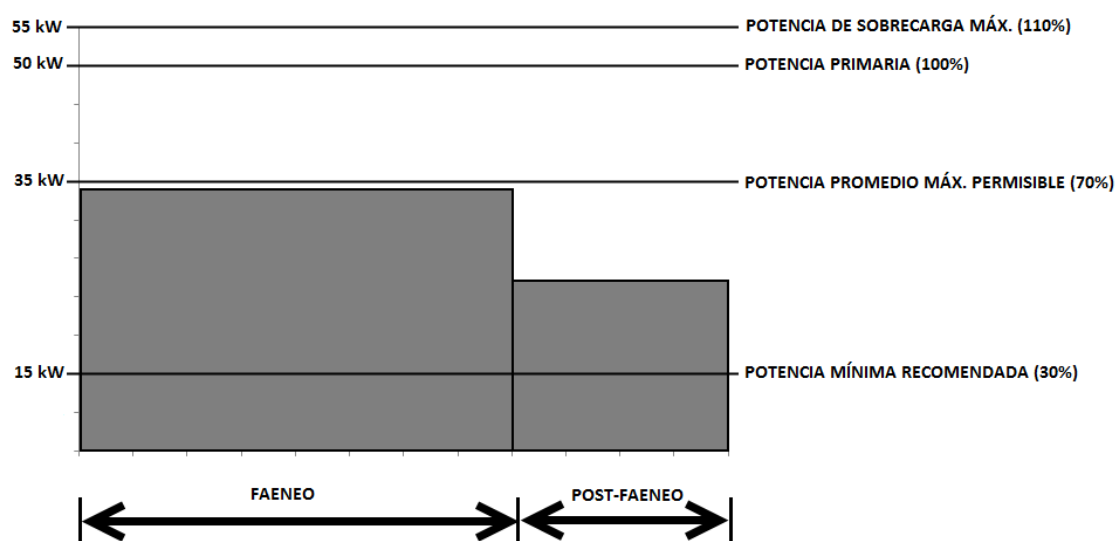


Figura 39: Cargas de faeneo y post-faeneo frente a rango de potencia del generador

La carga de trabajo de un equipo generador es la potencia que se obtiene a la salida expresada como un porcentaje de su potencia nominal. Nos permite describir la carga servida por el grupo eléctrico y se calcula empleando la siguiente expresión<sup>48</sup>:

$$Carga = \frac{P_i}{P_{ir}} \cdot 100\%$$

Donde  $P_i$  es la potencia generada a la salida del generador y  $P_{ir}$  es la potencia generada cuando el generador opera a su carga máxima. Determinar las cargas de trabajo resulta de utilidad ya que nos permite realizar un análisis de la eficiencia del trabajo de los equipos de combustión.

<sup>47</sup> Véase apartado 7.1.1

<sup>48</sup> Fuente: Artículo "Determining Electric Motor Load and Efficiency" del programa Motor Challenge del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

El grupo electrógeno seleccionado dispone de una potencia máxima de 55 kW. Se calculan las cargas de trabajo a las que se someterá al generador durante el faeneo y en las horas posteriores al mismo empleando los datos de potencia promedio conocidos.

$$Carga\ Faeneo = \frac{34}{55} \cdot 100\% = 61,82\%$$

$$Carga\ Post\ Faeneo = \frac{22}{55} \cdot 100\% = 40\%$$

Vemos que el grupo electrógeno tendrá una carga de trabajo de en torno al 62% de su potencia máxima durante el faeneo. Será la situación más habitual de trabajo debido a que el faeneo abarca un promedio de 8 horas de las 12 que se prevé hacer funcionar el grupo electrógeno. Se considera que el equipo está correctamente dimensionado para esta franja horaria.

Tras el faeneo la carga de trabajo se reduce al 40%. En esta franja horaria de 4 horas el motor podrá funcionar ya que la carga es superior al 30% mínimo recomendado, pero lo hará de forma menos eficiente. Por tanto, el grupo electrógeno está sobredimensionado para la franja horaria posterior al faeneo.

### 7.2.2 Eficiencias de trabajo

La eficiencia energética de un equipo de combustión se define como el ratio entre la potencia útil de salida y la potencia de entrada total, y normalmente se expresa en porcentaje. En el caso del grupo electrogeno elegido esta será la fracción entre la potencia eléctrica generada (potencia útil,  $N_{el}$ ) y la potencia calorífica teórica del biogás (potencia de entrada,  $N_f$ ). Se donomina eficiencia eléctrica debido a que la potencia útil se obtiene en forma de electricidad.

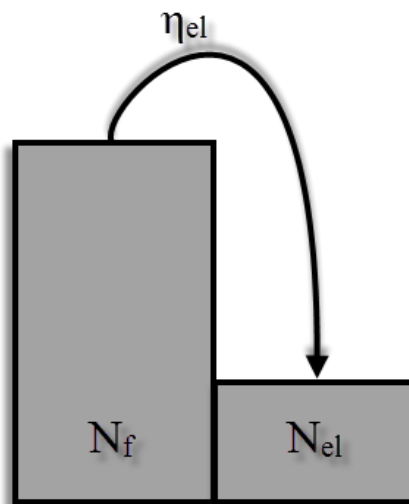


Figura 40: Definición de eficiencia eléctrica

Por tanto, la eficiencia eléctrica nos permite saber cual es la capacidad que tiene nuestro sistema generador para transformar la energía del biogás en electricidad. En el caso del grupo electrógeno elegido, esta es del 33% ya que el resto de la energía se disipa en forma de calor y pérdidas. Se aprecia que en caso de aprovechar el calor la eficiencia del equipo aumenta considerablemente. Esto ocurriría en caso de haber optado por un sistema de cogeneración, el cual no se consideró adecuado en el apartado 5.4.3, optando finalmente por un sistema para cobertura de picos.

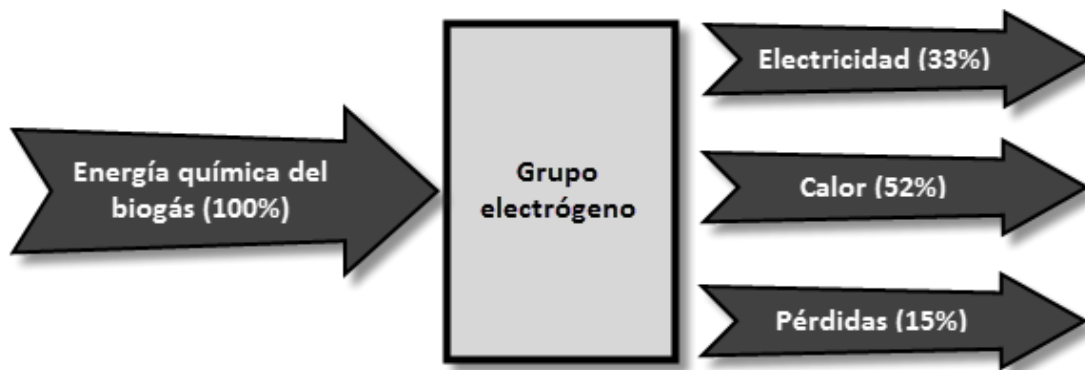


Figura 41: Transformación de la energía química del biogás

La mayoría de los equipos de combustión se diseñan para funcionar con cargas entre el 50 y el 100% de la potencia nominal, consiguiéndose la máxima eficiencia aproximadamente al 75% de la misma. Por ejemplo, un motor de 10 kW trabaja aceptablemente en un rango de carga que va de 5 a 10 kW y su eficiencia pico tiene lugar a 7,5 kW.

A la hora de analizar la conservación de la energía en equipos de combustión se asume que los mismos operan a la eficiencia de su placa de características. Asumir esto es razonable por encima del 50 % del punto de carga<sup>49</sup> ya que el pico de eficiencia tiene lugar en torno al 75% de la carga. Por otro lado, la eficiencia de estos equipos tiende a decrecer rápidamente cuando alimentan por debajo del 50% de su carga nominal.

La eficiencia eléctrica del grupo electrógeno que se ha seleccionado es de un 33% según viene indicado en las especificaciones del mismo. Esta es la eficiencia que tendrá lugar cuando el equipo alimente a cargas por encima del 50% de su potencia nominal en condiciones normales de funcionamiento<sup>50</sup>.

$$\eta_{el} = 0,33$$

El valor de la eficiencia del equipo se resiente cuando las condiciones de funcionamiento a las que se le somete no son las normales para las que su diseño ha sido pensado. El grupo electrógeno seleccionado ha sido diseñado para trabajar a altitudes menores a 1000 m.s.n.m. y con un biogás con un 65% de contenido en metano<sup>51</sup> es por ello que la eficiencia que alcanzará puede ser menor a la indicada en las especificaciones.

- El grupo electrógeno seleccionado va a trabajar a una altitud de 2570 m.s.n.m. y por este motivo el equipo fue sobredimensionado. El sobredimensionado sirvió para prevenir la pérdida de potencia debido a la altura sin tener en cuenta si se podía producir una reducción significativa de la eficiencia del equipo. En realidad el proceso de combustión depende principalmente de factores como el mezclado adecuado entre aire y combustible y de la presión y temperatura de la cámara de combustión. Por ello, y en base a la información de los fabricantes sobre el comportamiento de los equipos cuando funcionan en altura, se concluye que la eficiencia del equipo trabajando en altitud se mantendrá cercana a la de su valor de diseño.
- El grupo electrógeno seleccionado va a ser alimentado con biogás con un 55% de metano en su composición. El diseño del motor ha sido pensado

---

<sup>49</sup> Fuente: Artículo "Determining Electric Motor Load and Efficiency" del programa Motor Challenge del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

<sup>50</sup> Según indica la empresa Aqualimpia Engineering para considerar correctamente las especificaciones

<sup>51</sup> Información cedida por la empresa Aqualimpia Engineering.



para la combustión de biogás con un 65% de metano en su composición. El hecho de emplear un combustible menos energético obviamente implicará la obtención de menos energía a la salida. Por desgracia el empleo de un combustible con un menor porcentaje de biogás conllevará unas pérdidas en la producción de electricidad por reducción de la eficiencia eléctrica. Para el biogás empleado en el matadero el fabricante estima unas pérdidas de electricidad que podrían llegar a ser del 9%.

En base a lo que se ha mencionado se considera que el valor de eficiencia eléctrica del grupo electrógeno que se va a emplear en el matadero será del 30% debido a las pérdidas por el empleo de biogás con bajo porcentaje en metano.

$$\eta_{el(55\% CH_4)} = 0,30$$

De igual manera, este valor de eficiencia eléctrica tendrá lugar cuando el equipo alimente a cargas por encima del 50% de su potencia nominal funcionando con biogás con un 55% de metano en su composición. En el caso de alimentar a una carga menor al 50% de su potencia nominal, el valor de la eficiencia eléctrica decrecerá dramáticamente. Según la información ofrecida por el fabricante, esta reducción de la eficiencia será de un punto por cada 1% de reducción de la carga. Se trató de verificar la información del fabricante revisando el caso de la Universidad EARTH en Costa Rica, en donde se implantó un sistema de generación con biogás ineficiente. Esta revisión, adjunta en el Anexo VI.2, desveló una reducción aproximada de 1,6 puntos en la eficiencia por cada 1% de reducción de la carga a partir del 50%. Se trata de un caso muy concreto, pero permite apreciar la reducción que sufre la eficiencia y dar por válido el dato del fabricante.

$$\eta_{el(Carga\ 40\%)} = 0,20$$

### 7.2.3 Resultados

A continuación se adjunta una tabla que muestra los valores de los parámetros para las dos situaciones de trabajo a las que se someterá al grupo electrógeno durante sus doce horas de funcionamiento diario.

	Duración [h]	Carga (%)	Eficiencia (%)
Faeneo	8	62	30
Post-Faeneo	4	40	20

Tabla 30: Parámetros de trabajo del grupo electrógeno

## 7.3 Cálculo de la energía eléctrica generada y del biogás consumido por el grupo electrógeno

La determinación de los parámetros de trabajo del grupo electrógeno llevada a cabo en el apartado anterior permite calcular la electricidad que generará el mismo y el biogás que consumirá para este cometido. Los parámetros que se han determinado en el apartado anterior han sido la carga de trabajo y la eficiencia, los cuales se vio que estaban relacionados entre sí y adquirirían distintos valores en cada franja horaria. La carga de trabajo permite determinar energía eléctrica que genera el grupo electrógeno mientras que la eficiencia establece una relación entre la energía eléctrica generada y la energía química del combustible.

Se realizan los cálculos de la energía eléctrica generada y del biogás consumido en un día de trabajo del matadero municipal de Cochabamba partiendo de las siguientes consideraciones:

- La potencia nominal del equipo viene dada por sus especificaciones y es de 55 kW.
- La potencia disponible es la máxima que puede entregar el equipo y es de 38,5 kW. Se ha considerado que hay disponible un 70% de la potencia nominal al considerar la limitación de potencia debida a la altitud y un autoconsumo del 3% por parte de la planta.
- La potencia entregada es la que brinda el generador debido a la carga de trabajo. No podrá ser mayor a la potencia disponible de 38,5 kW. Esto nos limita el uso del generador a servir cargas por debajo del 70% de la potencia nominal del equipo.
- En base a la información ofrecida por el fabricante, se generará menos energía eléctrica debido a una caída en la eficiencia del equipo por el empleo de biogás con bajo porcentaje de metano. Esto afecta a la eficiencia durante el faeneo, que no alcanzará el valor indicado en las especificaciones y será del 30%.
- En base a la información ofrecida por el fabricante la eficiencia del generador se reducirá un punto por cada 1% de reducción de la carga por debajo del 50%. Esto afecta a la eficiencia durante el post-faeneo, que será tan solo del 20%.

Se realizan los cálculos teniendo en cuenta las dos situaciones de trabajo que se dan en un día, denominadas faeneo y post-faeneo, cuyos parámetros de trabajo ya fueron mostrados en el apartado 7.2.3:

<b>Faeneo - Carga 62%</b>	
Potencia nominal	55 kW
Potencia disponible	38,5 kW
Potencia entregada	34,1 kW
Horas de funcionamiento	8 h
Energía eléctrica	272,8 kWh
Eficiencia eléctrica ( $\eta_{el}$ )	30%
Energía necesaria del combustible	909,3 kWh
PCI biogás	5,21 kWh/m <sup>3</sup>
Biogás necesario	174,59 m <sup>3</sup>

Tabla 31: Cálculo de electricidad generada y biogás consumido (Faeneo)

<b>Post-Faeneo - Carga 40%</b>	
Potencia nominal	55 kW
Potencia disponible	38,5 kW
Potencia entregada	22 kW
Horas de funcionamiento	4 h
Energía eléctrica generada	88 kWh
Eficiencia eléctrica ( $\eta_{el}$ )	20 %
Energía necesaria del combustible	440 kWh
PCI biogás	5,21 kWh/m <sup>3</sup>
Biogás necesario	84,48 m <sup>3</sup>

Tabla 32: Cálculo de electricidad generada y biogás consumido (Post-Faeneo)

Por tanto, en un día normal de funcionamiento del grupo electrógeno que incluya 8 horas de funcionamiento durante el faeneo y cuatro tras el mismo, el grupo electrógeno generará un total de 360,8 [kWh/día] de energía eléctrica y para ello consumirá un total de 259,1 [m<sup>3</sup>/día] de biogás. Estos datos se emplearán posteriormente para realizar los balances de combustible y energía eléctrica que permitirán dar una valoración definitiva del funcionamiento del equipo elegido.

Si se atiende al consumo del motor, se puede calcular un consumo de 0,64 [m<sup>3</sup>/kWh] para las ocho horas de duración del faeneo. Consumo que aumenta para las cuatro horas posteriores al mismo hasta 0,96 [m<sup>3</sup>/kWh]. Esta variación entre ambas franjas horarias es debida a que la eficiencia es menor tras el faeneo que durante el mismo, lo cual fue visto en el apartado 7.2.2. Se puede apreciar una gran diferencia respecto a los 0,58 [m<sup>3</sup>/kWh] de consumo que figuran en las especificaciones del grupo electrógeno elegido. Esta diferencia es debida a que el dato ofrecido por los fabricantes es el del consumo del motor funcionando a potencia nominal con un biogás con contenido del 65% en metano,

condiciones que mantienen la eficiencia eléctrica en un 33%. Las condiciones de trabajo a las que el grupo electrógeno es sometido en el matadero municipal de Cochabamba le hacen trabajar a menor eficiencia y es esto lo que eleva el consumo de biogás.

Teniendo en cuenta la duración de las franjas horarias designadas como faeneo y post-faeneo, se puede calcular el caudal de biogás necesario para alimentar el motor en cada una de estas franjas. Se obtiene un caudal para el faeneo de 21,82 [m<sup>3</sup>/h] mientras que para el post-faeneo es de 21,12 [m<sup>3</sup>/h]. El caudal requerido es algo menor tras el faeneo debido a que la carga a alimentar se reduce, pero en cualquier caso se aprecia poca variación entre los caudales de ambas situaciones. Aunque el caudal de mantenga en un rango similar se generará más energía eléctrica durante el faeneo, como se ha podido comprobar al calcular el consumo que tendrá el motor.

La siguiente tabla muestra a modo de conclusión los resultados obtenidos, incluyendo además la información de los parámetros de trabajo que fueron determinados en el apartado 7.2.

Franja horaria	Duración [h]	Carga [%]	Eficiencia [%]	Electricidad generada [kWh]	Biogás consumido [m <sup>3</sup> ]	Consumo del motor [m <sup>3</sup> /kWh]	Caudal de biogás [m <sup>3</sup> /h]
Faeneo	8	62	30	272,8	174,59	0,64	21,82
Post-Faeneo	4	40	20	88	84,48	0,96	21,12
				360,8	259,07		

Tabla 33: Resultados de la caracterización

## 7.4 Análisis del biogás consumido por el grupo electrógeno

### 7.4.1 Viabilidad del suministro de biogás

La producción de biogás en un biodigestor anaeróbico es continua a lo largo de las 24 horas del día. No ocurre lo mismo con el consumo del mismo, el cual para el caso del matadero está concentrado en una fracción de tiempo de 12 horas. Se hace necesario garantizar que el biogás suministrado será suficiente para asegurar el funcionamiento del motor. En el apartado anterior se determinó que el consumo total de biogás por parte del equipo de combustión para un día de trabajo del matadero es de 259,07 [m<sup>3</sup>/día]. Esta cantidad es inferior a la cantidad de biogás diario disponible para electricidad estimada en 368,4 [m<sup>3</sup>/día]. Esto no permite apreciar si el suministro será adecuado, ya que para ello es necesario realizar una comparación entre la velocidad de generación del biogás y el consumo del grupo electrógeno.

Existen diversos factores que afectan la producción de biogás, tales como la composición de las aguas residuales, la temperatura de las mismas, la carga volumétrica, el

tiempo de retención, el grado de mezclado y la presencia de inhibidores del proceso. Estos factores podrán ser controlados por los biodigestores y tendrán una fuerte dependencia del clima del emplazamiento. En el apartado 3.4.4 fueron descritos los biodigestores que hay actualmente funcionando en el matadero. El cometido de los mismos es realizar pruebas cuyos resultados sirvan para determinar el diseño del sistema que permita tratar la totalidad de las aguas residuales generadas en las instalaciones. La importancia de dichas pruebas radica en que son realizadas con las mismas aguas residuales del matadero y en la ubicación en la que se encuentra el mismo, la cual se mantendrá en el proyecto que trate la totalidad de las aguas residuales.

A continuación se presentan los resultados de una de estas pruebas, los cuales fueron obtenidos por Telma Flores, alumna de la UMSS<sup>52</sup> que basó su tesis en estudiar el comportamiento de los biodigestores del matadero. Dichos resultados revelan cual es el ritmo de generación de biogás de los biodigestores del matadero en cuatro franjas horarias:

Franja horaria	Producción de biogás (%)
00:01 - 6:00	0,16808159
6:01 - 12:00	0,36485699
12:01 - 18:00	0,31645595
18:01 - 00:00	0,15060547

Tabla 34: Perfil de producción de biogás por franjas horarias. Fuente: Telma Flores

Estos resultados permiten apreciar que la mayor parte del biogás se genera durante el día, lo cual se puede achacar a un incremento de la temperatura en el interior del biodigestor debido a la radiación solar y que fomenta la digestión anaeróbica. Coincidirá por tanto el tramo de mayor producción de biogás con la franja horaria en la que funciona el grupo electrógeno<sup>53</sup>. Se emplean estos mismos datos para valorar el caso en el que todas las aguas residuales son tratadas y que, como se vio en el apartado 5.1, dotaban al matadero de un potencial para producción de biogás de 650 [m<sup>3</sup>/día].

<sup>52</sup> Universidad Mayor de San Simón. Universidad pública de Bolivia cuya sede está ubicada en la ciudad de Cochabamba.

<sup>53</sup> La cual fue designada de 7:00 a 19:00.

Franja horaria	Producción de biogás (%)	Biogás producido (m <sup>3</sup> )
00:01 - 6:00	0,16808159	109,253
6:01 - 12:00	0,36485699	237,157
12:01 - 18:00	0,31645595	205,696
18:01 - 00:00	0,15060547	97,894

Tabla 35: Biogás producido por franjas horarias

Si se tienen en cuenta estos datos y que el motor de combustión interna consumirá 259,07 [m<sup>3</sup>/día] de biogás en la franja horaria de 7:00 a 19:00, se puede llegar a pensar que no habrá problema de suministro de biogás al motor. Con el fin de asegurar esto se realizó un estudio más profundo de la disponibilidad de biogás teniendo en cuenta además el consumo de biogás de la caldera de agua caliente. Dicho estudio, adjunto en el Anexo VI.3, permitió apreciar un déficit de biogás durante las horas en las que opera el motor. En el mismo estudio se concluye que serán necesarios 100,07 m<sup>3</sup> de biogás para poder asegurar el suministro al motor. Esto no supone un problema debido a que, durante la franja horaria en la que no opera el motor, se produce una cantidad de biogás superior a la requerida para garantizar el suministro.

Deberá tenerse en cuenta que el sistema de tratamiento de las aguas residuales incluya un sistema encargado de almacenar el biogás durante las horas en las que no haya un consumo del mismo. Esta es una medida razonable debido a que el biogás tiene un valor energético del que no conviene desprenderse. El sistema de almacenamiento de biogás se llevará a cabo desde el propio diseño del biodigestor, el cual se concebirá con una cúpula para dar cabida a una gran cantidad de ese gas e incluirá depósitos adjuntos al mismo.

## 7.4.2 Balance de combustible

Tras asegurar el suministro de biogás en la franja horaria durante la cual opera el grupo electrógeno se realiza un balance de combustible. Para ello se emplean los datos calculados en el apartado 7.3 referentes a consumo de biogás por parte del grupo electrógeno, así como las cantidades totales de biogás expuestas en el apartado 5.1.

<b>Biogás total del matadero</b>	650 m <sup>3</sup> /día
<b>Biogás consumido por procesos térmicos</b>	281,6 m <sup>3</sup> /día
<b>Biogás disponible para electricidad</b>	368,4 m <sup>3</sup> /día
<b>Biogás consumido para generar electricidad</b>	259,1 m <sup>3</sup> /día
<b>Excedentes de biogás</b>	109,3 m <sup>3</sup> /día

Tabla 36: Balance de combustible

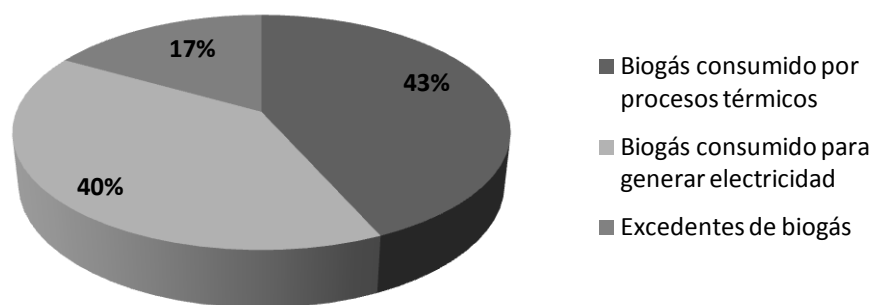


Figura 42: Conclusiones del balance de combustible

Se aprecia la disponibilidad de excedentes de biogás<sup>54</sup> sin un uso asignado. Dado que el biogás constituye una fuente de energía para el sistema de generación de electricidad que se plantea, se debe almacenar el que se produce durante las horas en las que no hay un consumo del mismo. El sistema que permita almacenar el biogás tendrá una capacidad máxima que en caso de que el sistema opere correctamente se alcanzará. En ese punto será necesario desprenderse de parte del biogás almacenado para poder dar cabida al biogás que se genere.

Se plantean dos opciones a las que destinar los excedentes de biogás de los que sea necesario desprenderse. Ninguna de ambas contempla la liberación del mismo a la atmósfera debido a la gran capacidad de destrucción del ozono que tiene el metano, el cual es el componente mayoritario del biogás. Dichas opciones son:

- Quemar los excedentes de biogás que no se puedan almacenar de los mediante el empleo de quemadores. Se trata de una tecnología conocida<sup>55</sup> y económica que permitiría consumir los excedentes de biogás evitando la liberación de metano a la atmósfera, el cual es un gas de efecto invernadero. La combustión del metano conllevará la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, gas que también fomenta el efecto invernadero aunque en una menor medida que el metano. En realidad, desde el punto de vista global sería una medida que no tendría efectos medioambientales negativos debido a que el CO<sub>2</sub> liberado sería un CO<sub>2</sub> neutro ya que los residuos del matadero antes de ser tratados también liberan este gas.

<sup>54</sup> 17% del total generado diariamente

<sup>55</sup> Actualmente los biodigestores del matadero cuentan con quemadores que fueron construidos por los operarios del matadero.

- Emplear los excedentes para alimentar un nuevo grupo electrógeno. Debería ser más pequeño, esto haría que la cantidad de electricidad generada no fuese muy elevada y no se contemplase la venta de excedentes a la red eléctrica. En cualquier caso se podría negociar la venta de la electricidad a algún particular.

Se realizó un análisis del equipo necesario para el consumo de los excedentes el cual se adjunta en el Anexo VI.4. Se pudo apreciar una baja amortización del equipo que desaconseja su compra en este momento. Además, el empleo de los excedentes en un grupo electrógeno impediría disponer de los mismos en caso de que se requiriesen. Es por ello que el sistema de tratamiento de las aguas residuales deberá contar con quemadores de biogás destinados a quemar los excedentes de dicho gas cuando no sea posible su almacenamiento.

## 7.5 Análisis de la energía eléctrica generada por el grupo electrógeno

Se hace necesario realizar un balance de energía eléctrica para conocer cuál es la cobertura que podemos lograr con el sistema de generación eléctrica. Se considerará en primer lugar la demanda actual del matadero y se analizará el porcentaje de sustitución de energía eléctrica que se puede alcanzar. A continuación se realizará lo mismo para la demanda estimada en el futuro empleando los datos del modelo de demanda futura que se obtuvo tras analizar las cargas del matadero municipal de Cochabamba<sup>56</sup>. Esto permitirá sacar conclusiones sobre lo adecuado que es el grupo electrógeno elegido para cubrir los picos de demanda del matadero.

### 7.5.1 Balance de energía eléctrica (Modelo de demanda actual)

Teniendo en cuenta que el matadero opera por 26 días al mes durante los 12 meses del año, se puede definir el programa de trabajo del grupo electrógeno siendo este de 312 [días/año]. A su vez se considerará una disponibilidad de la planta del 95% que tendrá en cuenta las posibles paradas de la planta por cuestiones de mantenimiento y el autoconsumo de la misma. Este será el programa de funcionamiento que se aplique también en el modelo de demanda futura.

Se realiza un balance de energía eléctrica para conocer la cobertura que se logrará con el grupo electrógeno en la actualidad. En el apartado 4.2.2 se contempló una demanda máxima actual de 8753 [kWh/mes] marcada por el mes de mayo de 2012. Por otro lado, el

---

<sup>56</sup> Véase apartado 6.1



estudio de las cargas del matadero realizado en el apartado 6.1 permitió obtener, por medio de un levantamiento de cargas, un consumo diario de 362,8 [kWh/día].

Para realizar el balance de energía eléctrica se empleará el dato obtenido mediante el levantamiento de cargas debido a que la caracterización del grupo electrógeno ha sido llevada a cabo a partir de dicho levantamiento. Este consumo diario de 362,8 [kWh/día] para el programa de trabajo considerado supone una demanda anual de 113,2 [MWh/año].

Se calcula la cobertura<sup>57</sup> actual que se logra con el grupo electrógeno teniendo en cuenta que el mismo genera 360,8 [kWh/día]<sup>58</sup>. Se recuerda que un día de trabajo para el modelo de demanda actual se consideró compuesto por 8 horas de faeneo.

<b>Energía generada</b>	360,8 kWh/día
<b>Programa de trabajo</b>	312 días/año
<b>Electricidad producida teórica</b>	112,57 MWh/año
<b>Disponibilidad de la planta</b>	95 %
<b>Electricidad producida real</b>	106,94 MWh/año
<b>Demanda anual actual</b>	113,2 MWh/año
<b>Cobertura lograda</b>	94,5 %

Tabla 37: Balance de energía eléctrica - Modelo de demanda actual

## 7.5.2 Balance de energía eléctrica (Modelo de demanda futura)

De manera análoga se realiza un balance de energía eléctrica para conocer la cobertura que se puede lograr cuando se alcance la demanda prevista para el futuro. Dicha demanda se estimó en 10200 [kWh/mes] en el apartado 4.3.3, la cual supone una demanda de 122,4 [MWh/año].

El estudio realizado a las cargas del matadero del apartado 6.1 permitió obtener un modelo de demanda futura consistente en 9 horas de faeneo y 3 de post-faeneo<sup>59</sup>. Se calcula la electricidad generada por el grupo electrógeno bajo esas consideraciones realizando los cálculos de igual manera que en el apartado 7.3.

<b>Faeneo - Carga 62%</b>		<b>Post-Faeneo - Carga 40%</b>	
<b>Potencia nominal</b>	55 kW	<b>Potencia nominal</b>	55 kW
<b>Potencia disponible</b>	38,5 kW	<b>Potencia disponible</b>	38,5 kW
<b>Potencia entregada</b>	34,1 kW	<b>Potencia entregada</b>	22 kW
<b>Horas de funcionamiento</b>	9 h	<b>Horas de funcionamiento</b>	3 h
<b>Energía eléctrica generada</b>	306,9 kWh	<b>Energía eléctrica generada</b>	66 kWh

Tabla 38: Electricidad generada (Faeneo y Post-Faeneo)

<sup>57</sup> Porcentaje de sustitución de la electricidad de la red por electricidad generada a partir del biogás.

<sup>58</sup> La electricidad generada fue determinada en el apartado 7.3

<sup>59</sup> Véase apartado 6.1.2

Por tanto, para el modelo de demanda futura en el cual 9 de las 12 horas del funcionamiento del motor son de faeneo, el grupo electrógeno genera un total 372,9 [kWh/día]. Conviene señalar que el consumo de biogás apenas varía en esta situación futura y es por ello eso que se ha excluido esta información del análisis.

Para el mismo programa de funcionamiento que en el apartado 7.5.1 se calcula la cobertura que se puede llegar a lograr en el futuro.

<b>Energía generada</b>	372,9 kWh/día
<b>Programa de trabajo</b>	312 días/año
<b>Electricidad producida teórica</b>	116,35 MWh/año
<b>Disponibilidad de la planta</b>	95 %
<b>Electricidad producida real</b>	110,53 MWh/año
<b>Demanda anual futura</b>	122,40 MWh/año
<b>Cobertura lograda</b>	90,3 %

Tabla 39: Balance de energía eléctrica - Modelo de demanda futura

### 7.5.3 Conclusiones

Las conclusiones del análisis de la energía eléctrica generada son muy positivas. Se puede apreciar que empleando el grupo electrógeno en la actualidad la cobertura alcanzada sería del 94,5%. Esto quiere decir que el 94,5% de la energía consumida por el matadero sería autogenerada a partir del biogás, propiciando un gran ahorro en las facturas eléctricas. El porcentaje es muy alto, más aun si se tiene en cuenta que el motor trabaja durante doce horas diarias. El 6,5% de demanda restante sería cubierto por la red eléctrica, y sería la debida a las 12 horas restantes del día en la que apenas hay un consumo eléctrico por parte de las instalaciones. Se podría haber esperado una disponibilidad más alta ya que el levantamiento de cargas indicó que la franja horaria debida al faeneo y al post-faeneo suponía un 99% del consumo eléctrico diario. En realidad esa cobertura no se alcanza debido a que la disponibilidad de la planta no es del 100%.

Por otro lado, para el modelo demanda futura la cobertura se reduce hasta el 90,3%. Este dato, a pesar de ser menor, sigue siendo muy positivo ya que permite ver que, en caso de que la demanda de carne aumente, el ahorro que se conseguirá en las facturas seguirá siendo muy alto. Esta reducción en la cobertura lograda se debe a que en el modelo de demanda futura el faeneo dura más, mientras que el grupo electrógeno funciona el mismo número de horas, por lo que no logra cubrir la demanda tan eficazmente.

Se puede concluir asegurando que, de aquí a los próximos diez años, el porcentaje de sustitución de la energía de la red por energía generada a partir de biogás en el matadero estará entre el 90,3 y el 94,5%, siendo más alto durante los primeros años y

decreciendo conforme la demanda de carne (y por tanto la duración del faeneo) se vaya incrementando. Dado que el ahorro que se puede conseguir en las facturas eléctricas será proporcional a la cobertura lograda, para el posterior análisis económico se considera que dicho ahorro será del 92,4%.



## 8. Descripción del sistema generador

Llegado este punto del proyecto, se hace necesario describir el sistema de generación de electricidad que está siendo planteado en este proyecto. En este apartado se proporcionará la información necesaria para entender el funcionamiento del sistema generador al completo identificando los elementos involucrados en su funcionamiento. La información expuesta será de utilidad para el posterior análisis económico.

### 8.1 Ubicación del sistema generador

El sistema de generación de electricidad está pensado para una ubicación exterior. Esto se debe a que situar el grupo electrógeno cerca del biodigestor facilita el suministro de combustible al mismo que evita los costes asociados a tener que transportar el biogás. Además, las instalaciones del matadero disponen de una amplia parcela sin edificar<sup>60</sup> que podría albergar tanto al sistema generador de electricidad como al biodigestor que permita tratar la totalidad de las aguas residuales.

Las principales ventajas de implementar el sistema en una ubicación exterior son las siguientes:

- Evacuación sencilla de los gases de combustión. En caso de una ubicación en un recinto cerrado se requeriría de un circuito aislado para expulsar los gases al exterior.
- No es necesaria la instalación de conductos de refrigeración y ventilación. El calor desprendido por el equipo puede ser liberado directamente al ambiente.
- Se evita acondicionar un habitáculo en el interior del edificio para albergar al sistema. Instalando el mismo en una ubicación exterior tan solo se debe disponer una cubierta que proteja la máquina del polvo y las inclemencias meteorológicas tales como lluvia, rocío, radiación solar, etc.
- Se reducen las intromisiones por ruido al personal que se encuentra trabajando en el edificio.
- El riesgo de incendio es menor.

---

<sup>60</sup> Véase apartado 3.2.1



Figura 43: Grupo electrógeno a biogás instalado en una ubicación exterior. Fuente: AQL Engineering

## 8.2 Sistema de tratamiento de las aguas residuales.

El sistema que permita al matadero autoabastecerse de energía eléctrica se apoya en un sistema que consiga tratar la totalidad de las aguas residuales generadas por las instalaciones, ya que es esto lo que permite obtener el biogás que se emplea como combustible. El dimensionamiento y diseño de dicho sistema de tratamiento no forma parte de este proyecto. No obstante, se hace necesario explicar el funcionamiento de dicho sistema para poder entender el del sistema generador de electricidad. Es por ello que en este apartado se describirá el funcionamiento del sistema de tratamiento de las aguas residuales que produce el biogás que sirve como combustible para generar electricidad.

En el sistema de tratamiento de las aguas residuales se puede diferenciar claramente la existencia de dos fluidos muy distintos: El biogás (gaseoso) y el sustrato (líquido). A la entrada del biodigestor el sustrato está compuesto por la mezcla que forman las distintas aguas residuales del matadero. En el biodigestor tiene lugar la digestión anaeróbica que da como resultado biogás y biol, siendo el biol simplemente el sustrato tras haber sido sometido a la digestión anaeróbica y que se obtiene a la salida del biodigestor. El sistema que trate las aguas residuales debe gestionar correctamente ambos fluidos. Sus elementos principales figuran en el siguiente esquema y serán descritos a continuación:

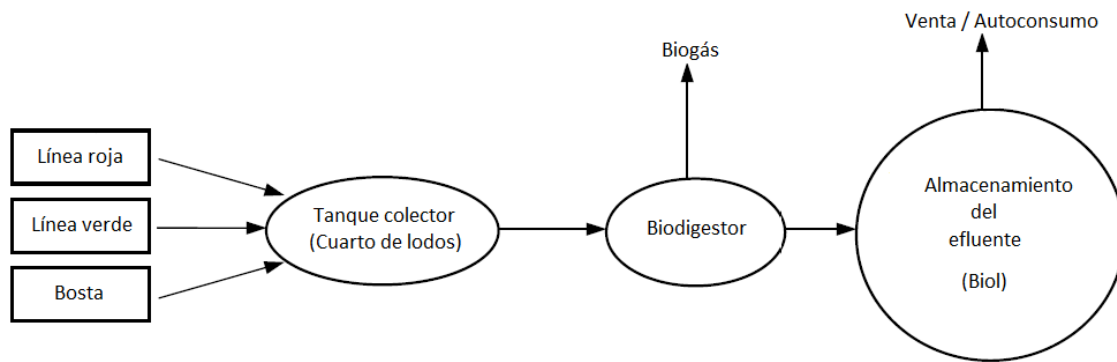


Figura 44: Sistema de tratamiento de aguas residuales

## 8.2.1 Tanque colector

El sustrato debe almacenarse en una cámara de carga antes de su ingreso en el biodigestor. El objetivo de esto es homogeneizar la mezcla y diluirla en agua, haciendo el sustrato adecuado para alimentar los biodigestores. Dicha cámara debe estar abierta a la atmósfera para facilitar la deposición de los sólidos en la superficie por gravedad y que los mismos puedan ser extraídos manualmente.

En el matadero, esta labor la realiza el cuarto de lodos<sup>61</sup> ya que en él confluyen la totalidad de las aguas residuales generadas por las instalaciones. Actualmente, del efluente que llega al cuarto de lodos<sup>62</sup>, 1000 litros son destinados a alimentar los biodigestores mientras que el resto es botado al alcantarillado. En el futuro sistema de tratamiento, el cuarto de lodos hará la labor de tanque colector, en donde se llevará a cabo el almacenamiento de los residuos, los cuales se irán bombeando al interior del biodigestor paulatinamente. No es necesaria la adición de agua al efluente que llegue al cuarto de lodos ya que las líneas<sup>63</sup> que confluyen en el mismo ya llegan diluidas.



Figura 45: Deposición de sólidos por gravedad en el cuarto de lodos

<sup>61</sup> Véase apartado 3.5.5 en donde fue descrito el cuarto de lodos.

<sup>62</sup> Efluente total de aguas residuales de 162.500 [L/día]

<sup>63</sup> Véase apartado 3.5 en donde fueron descritas las líneas de residuos.

## 8.2.2 Biodigestor

Para determinar el biodigestor adecuado que permita tratar la totalidad de las aguas residuales generadas por el matadero es necesario continuar con la realización de pruebas al sustrato actual empleando los biodigestores que ya están instalados<sup>64</sup>. Esto se debe a que el proceso para dimensionar un biodigestor para una cantidad tan grande de agua residual y con una composición que incluye una gran variedad de residuos (sangre, grasas, estiércol...) no se encuentra estandarizado.

La bibliografía disponible acerca de proyectos de producción de biogás abarca en su gran mayoría el caso de granjas, en las cuales el sustrato empleado lo componen excretas de ganado diluidas en agua. Esto ha permitido que se haya estandarizado el diseño de biodigestores familiares de bajo costo con este tipo de sustrato y que se pueda conocer de antemano como dimensionarlos. Por contra, el diseño de biodigestores para un sustrato en el que predominan la sangre y los fluidos estomacales no se encuentra estandarizado. Es por ello que el matadero se encuentra en fase de pruebas para poder determinar cómo será el biodigestor más adecuado para los residuos que genera.

Se puede dimensionar el biodigestor de igual manera que uno de ganado convencional para hacernos a la idea de cuál puede ser su tamaño aproximado. Mediante los cálculos adjuntos en el Anexo VI.5, se obtiene que es necesario un biodigestor de 5850 m<sup>3</sup> para tratar la totalidad de las aguas residuales del matadero. Está cifra desvela que se tratará de un biodigestor enorme, y para construirlo se deberá adoptar un modelo de biodigestores conocido como biodigestores de laguna cubierta con recorrido eficiente.



Figura 46: Construcción de un biodigestor de 1000m<sup>3</sup>. Fuente: Construcción de un biodigestor de laguna cubierta con recorrido eficiente, J.Martí Herrero

<sup>64</sup> Véase apartado 3.4.4 en donde fueron descritos los biodigestores que se encuentran actualmente operando en el matadero.



Los biodigestores de laguna cubierta con recorrido eficiente son una nueva propuesta de diseño que trata de aprovechar todo el volumen del biodigestor. Para ello, el sustrato es obligado a recorrer la totalidad del biodigestor guiado por unas mamparas que forman corredores internos. Se trata de una tecnología conocida y que ya se ha llevado a cabo en Bolivia. Concretamente en el departamento de Santa Cruz se llevó a cabo la construcción de uno de 1000 m<sup>3</sup> destinado a generar biogás a partir de estiércol de cerdo.

Independientemente del tamaño del biodigestor, el recinto en donde tendrá lugar la digestión anaeróbica deberá cumplir los siguientes requisitos:

- Ser impermeable al agua y al gas para evitar pérdidas de efluente no digerido totalmente, el cual supondría un importante foco de contaminación.
- Tener una buena capacidad aislante para evitar al máximo las pérdidas de calor, las cuales harían variar la temperatura en el interior del biodigestor.
- Minimizar la relación superficie/volumen con el fin de ahorrar material y mano de obra, así como para reducir la superficie de intercambio de calor.
- Contar con una estabilidad estructural que le permita soportar cargas estáticas y dinámicas.

### 8.2.3 Almacenamiento del efluente

La carga diaria de aguas residuales introducida al biodigestor es sometida dentro del mismo al proceso de digestión anaerobia produciendo biogás. Por otro lado, a la salida del biodigestor, se obtiene un líquido ya digerido el cual sirve como un excelente fertilizante. A este fertilizante se le suele llamar de forma general biol. El biol inicialmente se ha considerado un producto secundario pero actualmente está adquiriendo mucha importancia debido a que mejora fuertemente el rendimiento de las cosechas. Las aguas residuales del matadero, además de biogás, permitirán obtener una gran cantidad de biol, el cual deberá ser almacenado para su uso como abono o su venta.

Generalmente las plantas productoras de biogás cuentan con cámaras de descarga para el biol con un volumen dos o tres veces superior al de descarga diaria. En el caso del matadero no se requiere diseñar y construir ninguna cámara de descarga debido a que ya cuenta con un lugar en donde almacenar el biol. Se trata de una laguna exterior abierta a la atmósfera, la cual fue mencionada al describir el emplazamiento<sup>65</sup> y que ya se emplea actualmente para almacenar biol. En el sistema que consiga tratar la totalidad de las aguas

<sup>65</sup> Véase la descripción del emplazamiento realizada en el apartado 3.1.3

residuales del matadero se empleará esta misma laguna. El biol almacenado en la misma quedará a disposición del matadero pudiendo ser usado o comercializado como abono.

El traslado del biol a la laguna dependerá del diseño del biodigestor. Actualmente el traslado del biol se lleva a cabo mediante bombeo, pero un diseño adecuado del biodigestor podría ubicar la salida del mismo en la laguna evitando tener que emplear una bomba. En cualquier caso, si por cuestiones de diseño esto no se pudiese llevar a cabo, el transporte desde la salida del biodigestor hasta la laguna se llevaría a cabo mediante bombeo tal y como se hace actualmente.



Figura 47: Laguna de almacenamiento de biol del matadero municipal de Cochabamba

## 8.2.4 Gasómetros

El análisis del biogás consumido por el grupo electrógeno realizado en el apartado 7.4 desveló la existencia de excedentes de biogás<sup>66</sup> y la necesidad de almacenar parte de los mismos para garantizar la alimentación del grupo electrógeno<sup>67</sup>.

La forma más simple es almacenar los excedentes de biogás es a baja presión y empleando gasómetros. Un gasómetro es un depósito generalmente fabricado de polietileno en donde se almacena el biogás generado en otra parte de la planta para su posterior uso. Los gasómetros cuentan con válvulas de depresión y sobrepresión para permitir la entrada y salida del biogás, el cual llega directamente del biodigestor a la presión mismo. Para el caso del biodigestor que pretende implantarse en el matadero la presión que se alcanza en el interior del mismo será de en torno a 1,5 kPa<sup>68</sup>. Esta opción de almacenamiento se considera la más adecuada para el sistema de tratamiento de aguas

<sup>66</sup> Véase el balance de combustible realizado en el apartado 7.4.2

<sup>67</sup> Véase el análisis de suministro de biogás al grupo electrógeno realizado en el apartado 7.4.1

<sup>68</sup> Dato cedido por J.Martí Herrero basado en el seguimiento realizado a los biodigestores del matadero

que se implantará en el matadero municipal de Cochabamba. La opción de comprimir el biogás y almacenarlo a presiones medias (0,5 - 1,5 bar) o altas (hasta 300 bar) permitiría reducir el volumen de almacenamiento necesario. Sin embargo se descarta esta opción debido a que se trata de un tipo de almacenamiento que demanda un gasto extra de energía para comprimir el biogás. Además, los tanques necesarios para almacenar biogás a estas presiones son caros debido a que se les exige una rigidez estructural elevada.

La franja horaria de consumo de biogás y la intensidad con la que se consuma el mismo determinarán el volumen de almacenamiento requerido. La cantidad de biogás a almacenar será mayor cuanto más concentrado esté el consumo. Para una planta de generación de biogás es recomendable que el volumen almacenado no sea menor del 50% de la producción diaria. Para el caso del matadero, en donde se estimó que su potencial de generación de biogás era de 650 [m<sup>3</sup>/día]<sup>69</sup>, supondría tener almacenados un mínimo de 325 m<sup>3</sup> de biogás. Dado que el biogás almacenado debe poder emplearse tanto para la obtención de energía térmica (caldera e incineradora) como eléctrica (grupo electrógeno), los gasómetros deberán concebirse para poder extraer el biogás y destinarlo a dichas aplicaciones.



Figura 48: Gasómetro para almacenamiento de biogás. Fuente: Ecomembrane Environmental Technology

<sup>69</sup> Estimación realizada en el apartado 5.1

## 8.2.5 Quemadores

Cuando los gasómetros encargados de almacenar los excedentes de biogás lleguen a su capacidad máxima, será necesario eliminar parte de los excedentes para dar cabida al biogás producido. La eliminación de los excedentes se llevará a cabo mediante un quemador por haberse considerado la mejor opción para los mismos<sup>70</sup>. Someter al biogás sobrante a combustión evitará la liberación del mismo a la atmósfera. El beneficio ambiental de esta medida es evidente ya que se evita la liberación de metano ( $\text{CH}_4$ )<sup>71</sup>, gas que fomenta el efecto invernadero. En su lugar se emitirá dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), producto de la combustión de metano<sup>72</sup>, que también fomenta dicho efecto pero en una medida mucho menor. Concretamente el metano tiene un potencial de calentamiento global de 23.3, lo cual implica que en una media de tiempo de 100 años cada kg de  $\text{CH}_4$  calienta nuestro planeta 23 veces más que la misma masa de  $\text{CO}_2$ .

El sistema de tratamiento de las aguas residuales incluirá quemadores tanto en los gasómetros como en el biodigestor y su diseño será el mismo que el de los quemadores que funcionan actualmente en el matadero municipal de Cochabamba. Esto se debe a que su sencillez y bajo costo los hacen apropiados para esta labor y además se cuenta con la experiencia de un buen funcionamiento de este sistema.



Figura 49: Operarios del matadero municipal de Cochabamba haciendo funcionar el quemador. Fuente: Rada & Asociados

El modelo de quemador que se emplea actualmente en el matadero está conformado por una tubería flexible, la cual va unida a otra tubería con forma de “T” y finaliza en una válvula de apertura manual. El biogás es conducido a través de la tubería por

<sup>70</sup> Se consideró que esta era la mejor opción en el apartado 7.4.2

<sup>71</sup> Cosa que ocurriría si se liberase el biogás directamente a la atmósfera ya que el metano es el componente mayoritario del biogás.

<sup>72</sup> La combustión del metano se encuentra explicada en el Anexo IV.1

la propia presión que se genera en el interior del biodigestor, la cual para la ubicación del matadero es de en torno a 1,5 kPa. Al llegar a la "T", una de las vías conduce el biogás al exterior mediante la válvula de apertura manual. Mediante una chispa tiene lugar la combustión que evita la liberación del biogás a la atmosfera. La segunda de las vías conduce a una botella de plástico con una cierta altura de agua, sistema que funcionará como válvula de seguridad. En caso de que la presión del biogás se exceda en el interior del gasómetro o del biodigestor, este se libera a la atmosfera evitando el deterioro de los equipos. Los quemadores que hay actualmente en el matadero tan solo son capaces de quemar entre 0,5 y 0,75 [m<sup>3</sup>/h] de biogás, el cual es un ritmo menor al de producción de biogás<sup>73</sup>. A la hora de diseñar los nuevos quemadores deberá tenerse esto en cuenta para lograr que el caudal sea adecuado.

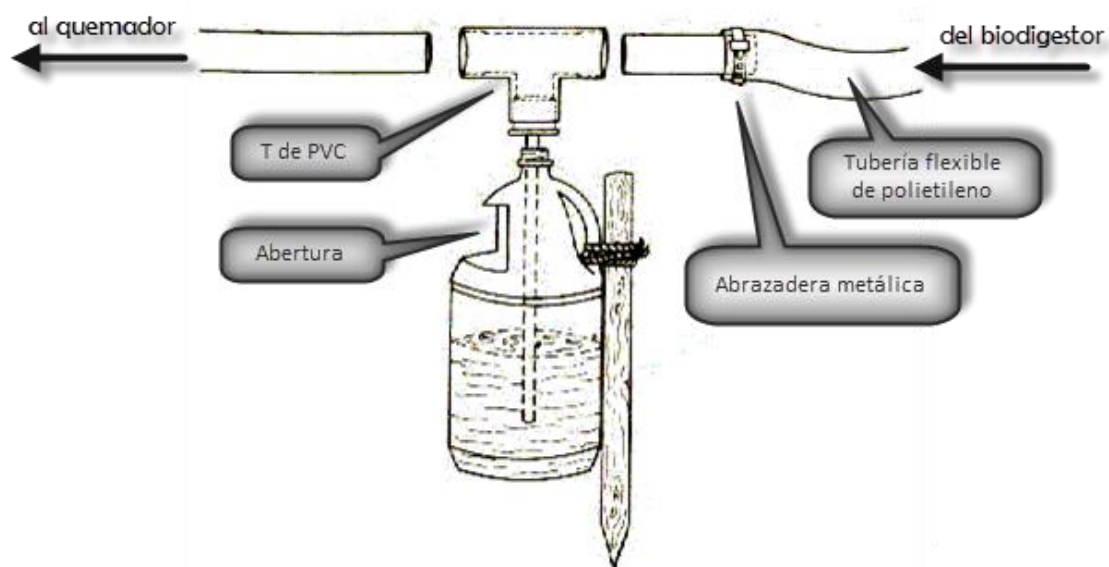


Figura 50: Esquema de quemador instalado en el matadero municipal de Cochabamba

### 8.3 Alimentación de combustible al grupo electrógeno

Los grupos electrógenos a gas utilizan combustibles gaseosos para su funcionamiento, ya sea gas natural, gas licuado de petróleo o, como en el caso de estudio, biogás. Sin importar el combustible usado, existen unos requisitos mínimos necesarios en la instalación que deben satisfacerse para asegurar la operación del sistema:

- El gas suministrado al conjunto generador debe ser de calidad aceptable, es decir, que la cantidad de energía por unidad de volumen de combustible sea alta.

<sup>73</sup> El ritmo de producción de biogás en el matadero municipal de Cochabamba fue visto en el apartado 7.4.1

- El suministro de gas debe tener suficiente presión, aportándose la apropiada para la operación en todo momento.
- El gas debe suministrarse al generador en suficiente volumen para que este pueda operar. Para ello habrá que elegir una tubería de transporte que permita el caudal adecuado de biogás. Lógicamente, cuanto mayor sea la calidad del combustible menor será el caudal requerido.

Estos requisitos se logran gracias a un sistema de alimentación de combustible cuyos elementos van a ser descritos con detalle en este apartado. Dichos elementos son:

- Filtro de remoción de H<sub>2</sub>S (2): Su función es eliminar el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) presente en la composición del biogás. El biogás producido en el biodigestor es transportado por medio de una bomba de vacío (1) a través de este filtro.
- Tanque de combustible (3): Su función es almacenar el biogás destinado a alimentar el grupo electrógeno. El biogás llega al tanque a través del filtro de remoción de H<sub>2</sub>S.
- Tren de calibración (4-8): Su función es hacer llegar el biogás desde el tanque hasta el grupo electrógeno en las condiciones adecuadas de presión, volumen y temperatura. El elemento principal del tren de calibración es el compresor (6), y su funcionamiento se complementa con válvulas, sensores y un filtro de gas.

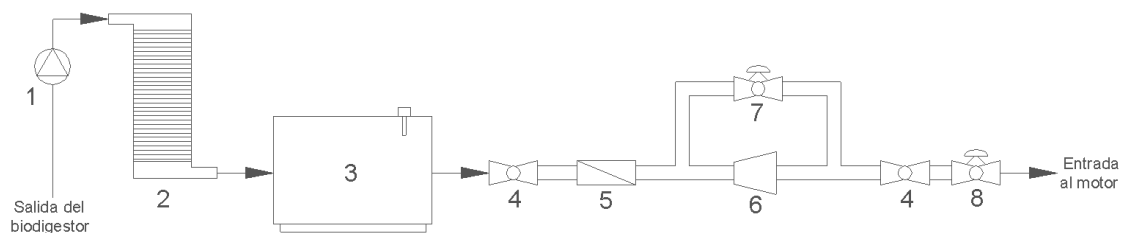


Figura 51: Esquema del sistema de alimentación de combustible

1	Bomba de vacío	5	Filtro de gas
2	Filtro de remoción de H <sub>2</sub> S	6	Compresor
3	Tanque de combustible diario	7	Válvula de recirculación
4	Válvula de cierre	8	Regulador de presión

Tabla 40: Componentes encargados de la alimentación del grupo electrógeno

### 8.3.1 Filtro de remoción de H<sub>2</sub>S

El biogás es una mezcla de gases compuesta por metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), vapor de agua (H<sub>2</sub>O) así como restos de hidrógeno (H<sub>2</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>), amoníaco (NH<sub>3</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>). El metano pertenece a la familia de los hidrocarburos, por tanto, tiene propiedades inflamables, mientras que los otros gases (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S, etc.) tan solo diluyen el biogás.

Dado que el biogás será el combustible que se empleará para la generación de electricidad, es de suma importancia garantizar que el mismo no contenga compuestos que vayan a dañar física y/o químicamente el equipo en el que se piensa aprovechar. En ese sentido habrá que tener muy en cuenta al contenido de sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico en el biogás. La diferencia entre ambos, es simplemente el estado físico en que se encuentran. El sulfuro de hidrógeno es un gas, mientras que el ácido sulfhídrico es el mismo sulfuro de hidrógeno que ha reaccionado con agua para formar un ácido. El sulfuro de hidrógeno y el metano se producen en el biodigestor, en el mismo proceso, por lo tanto la presencia de este compuesto en el biogás entra dentro de lo normal. El sulfuro de hidrógeno es el compuesto que le da al biogás su mal olor característico. No tiene color, es inflamable y extremadamente peligroso.

Características del H <sub>2</sub> S	
<b>Peso molecular</b>	34,08 g/mol
<b>Gravedad específica (relativa al aire)</b>	1,192
<b>Temperatura de autoignición</b>	250 °C
<b>Rango de explosión en aire</b>	4,5 a 45,5 %
<b>Umbral de olor</b>	0,47 ppb
<b>Concentración máxima a exposición de 8 horas</b>	10 ppmv
<b>Concentración máxima a exposición de 15 minutos</b>	15 ppmv
<b>Inmediatamente peligroso para la salud</b>	300 ppmv

Tabla 41: Características físicas y químicas del sulfuro de hidrógeno. Fuente: OSHA, 2002

Es importante llevar a cabo una remoción del ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) por las siguientes razones:

- Es extremadamente nocivo para la salud debido a su alta toxicidad.
- Puede causar daños internos por corrosión en equipos como generadores eléctricos, microturbinas, etc.
- Su combustión genera dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), compuesto que además de tóxico es dañino para el medio ambiente.

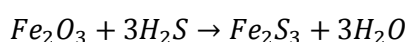
La presencia de H<sub>2</sub>S en combustibles ampliamente usados como el gas natural y derivados del petróleo han propiciado el desarrollo de la tecnología para su remoción. Esta

tecnología se basa en el uso final que se vaya hacer del biogás ya que definirá el nivel de remoción que se requiere.

Tecnología	Requerimientos para el procesamiento del gas
<b>Calentamiento (Caldera)</b>	H <sub>2</sub> S < 1000 ppm, 0,8-2,5 kPa presión, remover condensado (Cocinas: H <sub>2</sub> S < 10 ppm)
<b>Motores de combustión interna</b>	H <sub>2</sub> S < 100 ppm, 0,8-2,5 kPa presión, remover condensado, remover siloxano (Motor de cuatro tiempos es más susceptible a H <sub>2</sub> S que motores diesel)
<b>Microturbinas</b>	Tolerante a H <sub>2</sub> S en 70.000 ppm, > 350 BTU/scf, 520 kPa de presión, remover condensado, remover siloxanos
<b>Celdas de combustible</b>	PEM: CO < 10 ppm, remover H <sub>2</sub> S PAFC: H <sub>2</sub> S < 20 ppm, CO < 10 ppm, halógenos < 4 ppm MCFC: H <sub>2</sub> S < 10 ppm en combustible, halógenos < 1 ppm SOFC: H <sub>2</sub> S < 1 ppm, halógenos < 1 ppm
<b>Similar al gas natural</b>	H <sub>2</sub> S < 4 ppm, CH <sub>4</sub> > 95 %, CO <sub>2</sub> < 2% volumen, H <sub>2</sub> O < 0,0001 kg/MMscf, remover siloxanos y partículas, > 3000 kPa de presión

Tabla 42: Usos del biogás y requerimientos máximos de H<sub>2</sub>S. Fuente: Revista oficial nº53 de la escuela centroamericana de ganadería

En términos generales, existen cientos de tipos de tecnologías para la remoción del H<sub>2</sub>S, en el biogás. Por desgracia mucha de esta tecnología ha sido diseñada para la industria petrolera, lo que deja al sector agropecuario fuera del alcance económico y tecnológico. La tecnología de remoción que se considera más adecuada es la formada por una torre de absorción de H<sub>2</sub>S con medio filtrante de óxido de hierro. Funciona de tal manera que, al hacer fluir el biogás por la torre de absorción, el H<sub>2</sub>S contenido en el biogás reacciona con el óxido de hierro para formar sulfuro de hierro. El sulfuro de hierro, al ser un compuesto no gaseoso, no sigue el flujo de biogás quedando retenido en la torre.



El mantenimiento de este tipo de torres de absorción se limita al cambio del medio filtrante una vez cada 6 meses y tiene la gran ventaja de que el medio filtrante (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) se puede conseguir localmente

En base a lo expuesto se decide que el sistema de generación de electricidad del matadero municipal de Cochabamba disponga de una torre de absorción de H<sub>2</sub>S para acondicionar el biogás antes de su entrada al motor. La torre de absorción tendrá un volumen de 1100 litros e irá ubicada a la salida del biodigestor. En caso de querer emplear el biogás almacenado en los gasómetros<sup>74</sup> para alimentar el motor, deberá trasladarse el mismo a través de la torre de absorción. De esta forma, además de una protección del grupo electrógeno, se logrará proteger el resto de equipos que intervengan en el sistema de generación y que están ubicados tras la torre de absorción de H<sub>2</sub>S. Debido a que la

<sup>74</sup> Véase apartado 8.2.4



presión que se genera en el interior del biodigestor de los gasómetros no es la adecuada para llevar a cabo el transporte del biogás, se hará llegar el mismo a la torre de absorción mediante el empleo de bombas de vacío. Las bombas aumentarán la presión de 1,5 kPa que hay en el interior del biodigestor y de los gasómetros hasta unos 3,5 kPa, posibilitando el transporte del biogás a través del filtro de H<sub>2</sub>S.



Figura 52: Filtro de remoción de H<sub>2</sub>S. Fuente: VIOGAZ S.A.

### 8.3.2 Tanque de combustible

Tras someter al biogás generado en el biodigestor a una remoción de su contenido en sulfuro de hidrógeno pasará a ser almacenado en el tanque de combustible. La función de este tanque es la de recibir el biogás que se va produciendo progresivamente y almacenarlo, para que desde ahí el tren de calibración lo comprima y suministre al grupo electrógeno. Los tanques de almacenamiento de combustible gaseoso emplean habitualmente materiales como el acero inoxidable o el polietileno tubular, siendo estos últimos una tecnología idéntica a la de los gasómetros.



Figura 53: Ejemplo de depósitos de biogás fabricados en distintos materiales. Fuente: AQL engineering

Los sistemas que requieran de un tanque diario intermedio para el suministro de combustible deberán ser dimensionados aproximadamente para 2 horas de operación del generador a plena carga<sup>75</sup>. A pesar de que se puede emplear un mismo tanque para alimentar varios generadores, es preferible que haya un tanque de almacenamiento por cada generador en el sistema así como ubicar el mismo lo más cerca posible del conjunto generador. Se aprecia que para el sistema que pretende implementar el matadero solo se requiere de un tanque para alimentar a un único generador, encontrándose dentro del caso recomendado. Además, la ubicación exterior permitirá situar el tanque diario cerca del generador asegurando un suministro de combustible adecuado.

Se puede calcular el volumen de biogás que requerirá el generador durante dos horas de funcionamiento a plena carga. Recordando que el grupo electrógeno estará limitado por la altitud de la ciudad de Cochabamba, se define que el comportamiento del mismo a plena carga cuando trabaja al 70% de su potencia nominal. En ese punto su eficiencia eléctrica será del 30%, como ya se justificó en el apartado 6.5 en base al bajo porcentaje de metano en el biogás del matadero.

Funcionamiento 2h - Carga 70%	
<b>Potencia nominal</b>	55 kW
<b>Potencia disponible</b>	38,5 kW
<b>Potencia entregada</b>	38,5 kW
<b>Horas de funcionamiento</b>	2 h
<b>Energía eléctrica generada</b>	77 kWh
<b>Eficiencia eléctrica (<math>\eta_{el}</math>)</b>	30 %
<b>Energía necesaria del combustible</b>	256,67 kWh
<b>PCI biogás</b>	5,21 kWh/m <sup>3</sup>
<b>Biogás necesario</b>	49,28 m <sup>3</sup>

Tabla 43: Determinación del volumen del tanque de almacenamiento

<sup>75</sup> Indicado en el Manual de Aplicación para Conjuntos Generadores enfriados con Líquido de Cummins Power Generation

Se requerirán unos 49,3 m<sup>3</sup> de biogás para alimentar al generador durante dos horas funcionando a su máxima capacidad. Se puede estimar el volumen del tanque que permita almacenar esta cantidad de biogás teniendo en cuenta que el biogás requerido sale del biodigestor a aproximadamente 1,5 kPa, que la presión de almacenamiento impuesta por la bomba de vacío es de en torno a 3,5 kPa y considerando que la temperatura del biogás no varía de una etapa a otra.

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \rightarrow V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_2}\right) = 49,3 \cdot \left(\frac{1,5}{3,5}\right) = 21,13 \text{ m}^3$$

### 8.3.3 Tren de calibración

El biogás que se va a emplear como combustible en el grupo electrógeno debe cumplir ciertas condiciones relativas a volumen, calidad, presión de servicio, seguridad y control. Si estos parámetros no se cumplen el generador no podrá operar. La instalación de un tren de calibración antes del ingreso del biogás en el grupo electrógeno permitirá adecuar la presión y el caudal de biogás, evitar temperaturas que impidan la combustión, controlar el encendido y el apagado del compresor así como el cierre del paso de biogás. El diseño y construcción de trenes de calibración se rige por la norma alemana DVGW G620, la cual determina las seguridades y equipos de control que deben instalarse en un tren de calibración para instalaciones de biogás.



Figura 54: Tren de calibración. Fuente: AQL Engineering

Dentro del tren de calibración, el elemento más importante es el compresor, ya que es el encargado de adecuar la presión para que el caudal de biogás llegue al grupo electrógeno en condiciones de hacerlo funcionar. La presión aproximada a la que el biogás es almacenado en el tanque es de 3,5 kPa, la cual no es adecuada para alimentar al motor. El compresor se encarga de aumentar esta presión hasta aproximadamente 35 kPa para lograr que el caudal de biogás sea suficiente a la entrada del motor. Esta presión es

reducida antes de la entrada al motor hasta una contenida dentro del rango de trabajo que admite el motor<sup>76</sup>. Esto se consigue por medio de una válvula encargada de controlar la presión máxima de operación del generador situada al final del tren de calibración.

Para evitar someter al compresor a un daño prematuro, el tren de calibración cuenta con una etapa de filtrado de combustible justo antes de su entrada al compresor. En esta etapa tan solo se lleva a cabo un filtrado de las partículas en suspensión del combustible, quedando el ácido sulfhídrico sin tratar. La necesidad de la remoción del ácido sulfhídrico antes de la entrada compresor justifica la ubicación del filtro de H<sub>2</sub>S en una etapa anterior.

El resto de componentes del tren de calibración corresponden a elementos de seguridad y de control tales como válvulas y sensores de presión y temperatura. Destacar la existencia de una tubería de recirculación controlada por una válvula, la cual permite la recirculación del combustible en base a la medida de temperatura de un sensor. Si tras la compresión el combustible alcanza una temperatura demasiado elevada que no garantiza el funcionamiento del motor, la válvula actúa permitiendo la recirculación del biogás caliente.

## 8.4 Elementos del grupo electrógeno

El grupo electrógeno encargado de convertir la energía química del biogás en energía eléctrica fue elegido en el apartado 6.5 tras llevar a cabo un dimensionamiento del mismo. En el apartado 7 se caracterizó su funcionamiento apreciándose que funcionará correctamente adaptándose a las cargas impuestas por las instalaciones del matadero. No obstante, existen una serie de elementos en torno al mismo que aun no han sido descritos y los cuales son necesarios para garantizar su correcto funcionamiento. Dichos elementos se describen a continuación.



Figura 55: Grupo electrógeno a biogás. Fuente: AQL Engineering

<sup>76</sup> Presión de admisión del motor indicada entre 1 y 5,5 kPa por sus especificaciones. Véase catálogo adjunto en el Anexo V.6

### 8.4.1 Líneas de inyección y de retorno

Las líneas de inyección y de retorno establecen una unión entre la alimentación del grupo electrógeno y la entrada al motor de combustión. Permiten que en última instancia el combustible sea suministrado al motor en las condiciones adecuadas para que el mismo funcione.

La línea de inyección lleva el biogás desde el tren de calibración al motor. El biogás llega en las condiciones de presión adecuadas e indicadas en las especificaciones del grupo electrógeno entre 1 y 5,5 kPa. Por su parte, la línea de retorno se encarga de llevar de vuelta el combustible sobrante de los inyectores al tanque de almacenamiento de combustible. Dicha línea nunca debe ser conectada con la línea de succión del tren de calibración.

El dimensionamiento de estas líneas debe ser el adecuado para distribuir el volumen de biogás requerido por el grupo electrógeno. Deberán ser trazadas de manera que se evite el calentamiento excesivo del combustible y empleando mangueras flexibles para absorber el movimiento y la vibración del equipo generador.

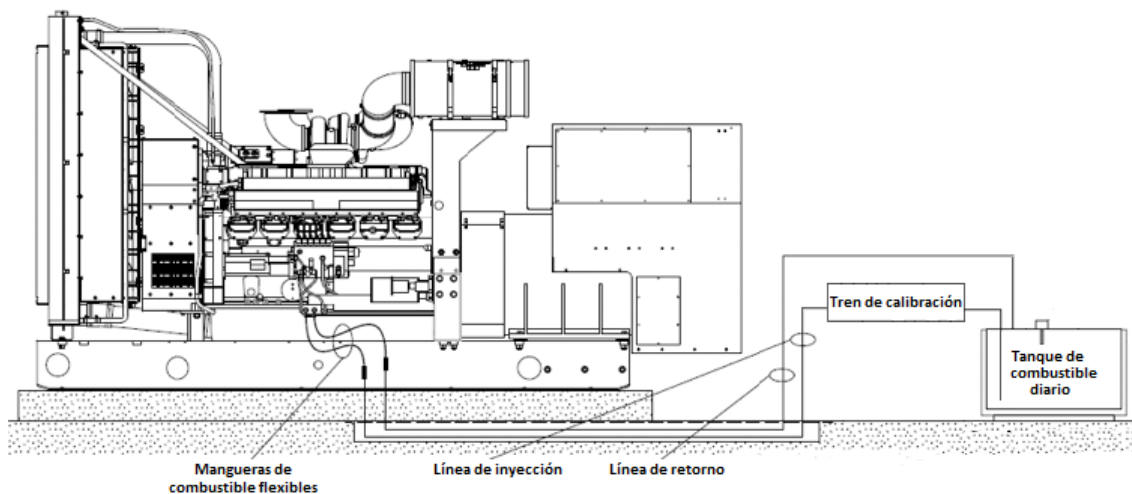


Figura 56: Líneas de inyección y de retorno de un grupo electrógeno

### 8.4.2 Sistema de escape

La función del sistema de escape es la de llevar los productos de la combustión del motor al exterior del recinto para dispersar las emanaciones de los mismos, el hollín y el ruido que se genera. Para una ubicación exterior, librarse de los productos de la combustión requiere de un sistema de escape mucho más simple que en el caso de interiores.

El sistema de escape debe diseñarse para minimizar la contrapresión en el motor. La contrapresión es la resistencia que ofrece el sistema de escape a la salida de los productos de la combustión. Una excesiva restricción en el escape tiene como resultado un aumento en el consumo de combustible, exceso de humo negro y una temperatura de escape muy elevada que puede provocar averías.

Un sistema típico de escape incluye los siguientes elementos:

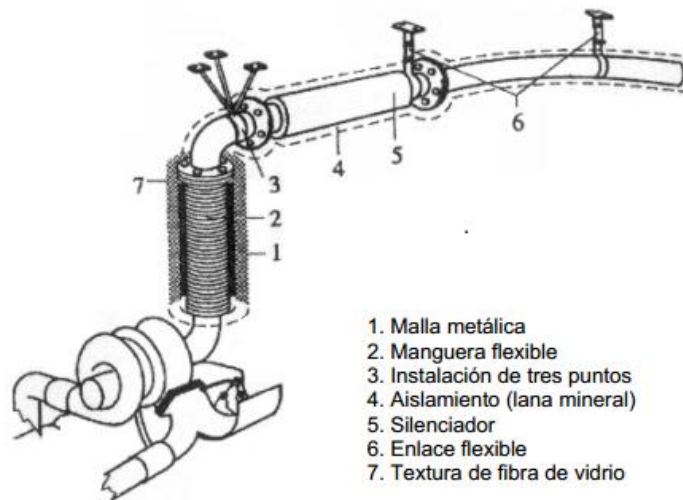


Figura 57: Sistema de escape típico. Fuente: Manual de aplicación de Cummins Power Generation

Al haberse escogido una ubicación exterior para el grupo electrógeno del matadero, el diseño del sistema de escape es más sencillo que el expuesto en la figura anterior.

Por un lado, el silenciador, cuya única función es la atenuación del ruido, pasa a ser un elemento opcional. En el caso de una instalación interior hubiera sido obligatorio para evitar molestar a los trabajadores con el ruido generado por el escape y lograr un entorno de trabajo adecuado. Sin embargo, para la ubicación exterior del matadero, el ruido no supone una molestia para los trabajadores debido a que los mismos trabajan dentro del edificio principal<sup>77</sup>.

Por otro lado la conducción de los gases de escape en una ubicación exterior es más fácil de llevar a cabo y no requerirá de anclajes. Tampoco requiere una conducción larga ya que los productos de la combustión pueden ser liberados prácticamente en el sitio. Los tubos empleados se separan del motor mediante conexiones flexibles capaces de tolerar las cargas por vibración, siendo además necesario colocar soportes para permitir la expansión de estas conexiones ya que un metro de tubo de acero se expande aproximadamente

<sup>77</sup> Edificio principal descrito en el apartado 3.1.3

1,2mm cuando su temperatura aumenta hasta los 100°C. También se debe tener en cuenta la posibilidad de que llueva, por lo que es necesario diseñar una salida del tubo de escape que no permita la entrada de agua de lluvia al sistema ajustando al conducto final una capucha o clapeta de auto-cierre.

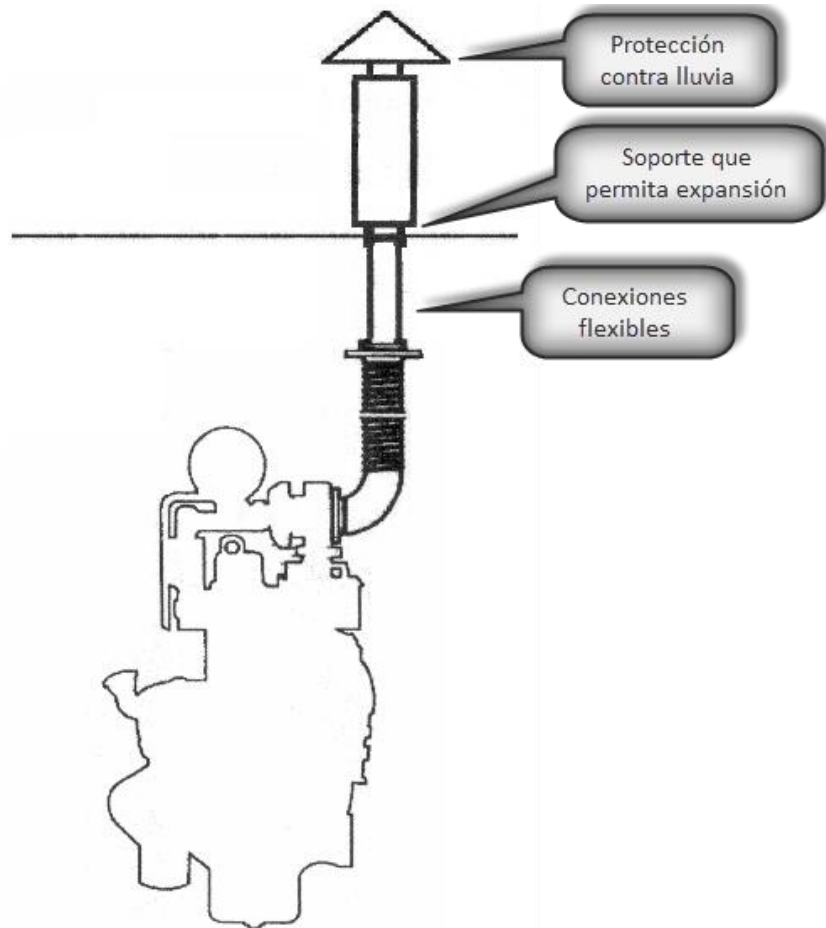


Figura 58: Sistema de escape para ubicación exterior

### 8.4.3 Cimentación

La cimentación debe ser capaz de soportar el peso del conjunto generador ensamblado y el de sus accesorios, así como resistir las cargas dinámicas y evitar que se transmita el ruido y la vibración. La transmisión de las vibraciones del conjunto generador, además de poder resultar molestas, pueden conllevar el fallo durante el servicio del mismo. Es por ello que todos los componentes que se conectan físicamente con el conjunto generador (Sistema de escape, líneas de combustible, cableado de suministro de energía AC, cableado de la carga, cableado de control, etc.) deben ser flexibles para absorber el movimiento de vibración sin dañarse.

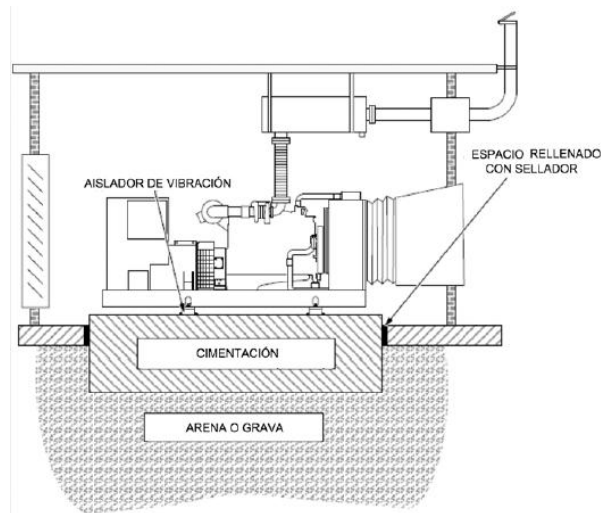


Figura 59: Cimentación de un grupo electrógeno. Fuente: Manual de aplicación de Cummins Power Generation

Se puede calcular la altura de la cimentación que requerirá nuestro grupo electrógeno de manera sencilla empleando la siguiente expresión:

$$h = \frac{W}{d \cdot l \cdot w}$$

Donde:

- El término  $W$  se refiere al peso de la cimentación, el cual es considerado como dos veces el peso del grupo electrógeno. El grupo electrógeno elegido pesa 1000 kg, por tanto:

$$W = 2 \cdot 1000 = 2000 \text{ kg}$$

- Los términos  $l$  y  $w$  son respectivamente la longitud y la anchura de la cimentación. Pueden determinarse sabiendo las dimensiones del grupo electrógeno y teniendo en cuenta que la cimentación debe extenderse al menos 150 mm por cada lado de la base del mismo. Las dimensiones del grupo electrógeno son de 2280 mm de largo y 1050 mm de ancho, por lo que:

$$l = 2280 + (2 \cdot 150) = 2580 \text{ mm} = 2,58 \text{ m}$$

$$w = 1050 + (2 \cdot 150) = 1350 \text{ mm} = 1,35 \text{ m}$$

- El término  $d$  es la densidad del material empleado en la cimentación. Este será hormigón armado cuya densidad es de 2350 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]:



$$d = 2350 \frac{kg}{m^3}$$

Se obtiene una altura de cimentación de 244 mm que nos permite definir la base de hormigón armado sobre la que se ubicará el grupo electrógeno. Además se concluye que se requerirán  $0,85 \text{ m}^3$  de hormigón armado para la construcción de la cimentación.

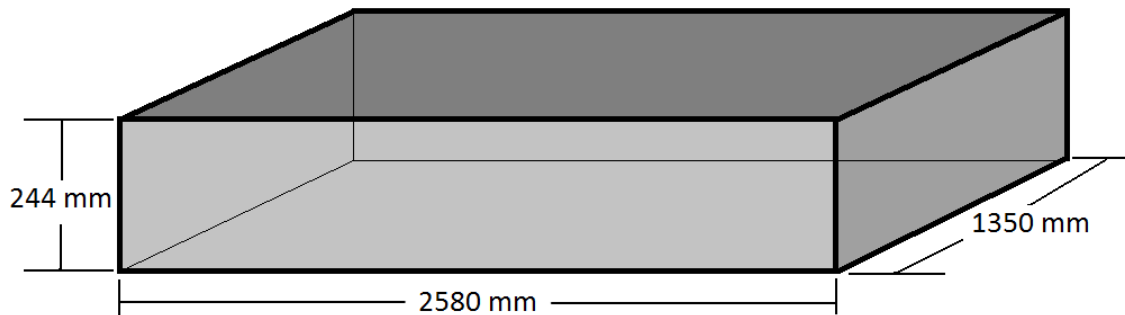


Figura 60: Medidas de la cimentación requerida para grupo electrógeno

#### 8.4.4 Ventilación

El equipo generador de electricidad sufre unas pérdidas de energía por emisión de calor con su entorno más próximo. En el caso de una instalación interior, la ventilación del cuarto del equipo generador es necesaria para proporcionar aire de combustión al motor, eliminar el calor emitido por el equipo y desalojar las emanaciones de gases peligrosos. Para el caso de una instalación exterior como la que se ha concebido para el matadero municipal de Cochabamba, el problema de la necesidad de ventilación desaparece.

En el exterior el calor se disipa mediante convección natural con el entorno. Esto se asegura en todo momento debido a que, por mucho calor que haga, nunca se alcanzarán temperaturas tan elevadas como para impedir la transferencia de calor del equipo con su entorno. Esto es algo que si podría ocurrir en una ubicación interior sin una ventilación adecuada, ya que el funcionamiento simultaneo de equipos podría llevar a alcanzar temperaturas muy altas que dificultasen la transferencia de calor. En definitiva, en el exterior se puede asegurar la transferencia de calor por convección natural no siendo necesarios dispositivos de ventilación.

En cualquier caso, por haber elegido una ubicación exterior, hay que prevenir que el equipo sea sometido a una excesiva radiación solar. La exposición del equipo al sol puede llevarlo a trabajar a temperaturas mayores a la de su funcionamiento óptimo y provocar fallos en el mismo. Es por ello que el recinto exterior debe incluir una cubierta que mantenga el equipo a la sombra durante su funcionamiento.

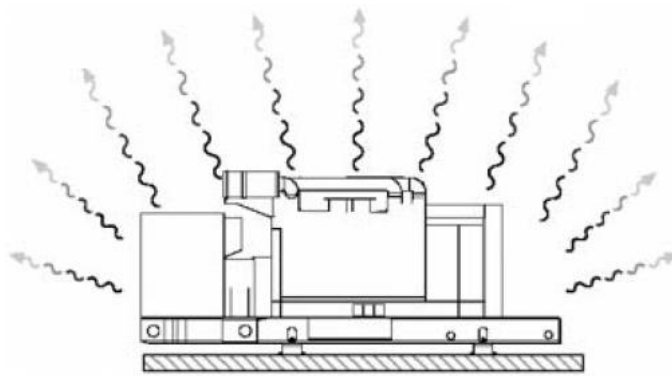


Figura 61: Calor emitido por el generador al exterior. Fuente: Manual de aplicación de Cummins Power Generation

### 8.4.5 Reducción de ruido

El ruido de un equipo generador durante su funcionamiento, de no ser tratado, se puede aproximar a los 100 dB cuando, en general, los niveles de ruido permitidos en una propiedad deben ser de menos de 60 dB. Además, el ruido del equipo se puede amplificar dependiendo de las condiciones del sitio. Este hecho deberá ser tenido en cuenta para el caso del matadero, en donde el ruido del generador puede ser molesto para trabajadores y vecinos. Para evitar los problemas adjuntos a la generación de ruido se adquirirá el grupo electrógeno con una cubierta que reducirá el ruido del mismo.

Los grupos electrógenos se pueden adquirir con cubiertas atenuadoras de sonido. Estas cubiertas forman un espacio cerrado alrededor del conjunto generador y reducen de forma efectiva el nivel de ruido producido por la máquina. En general, el precio de la cubierta está directamente relacionado con la atenuación de sonido requerido. Cuanto mayor sea la atenuación de ruido que se logre, mayor será el costo de la misma. Adquirir la cubierta para una ubicación exterior dota a la misma de una segunda función ya que mantendrá a resguardo al grupo electrógeno manteniéndolo protegido del polvo y las inclemencias meteorológicas.



Figura 62: Generador con cubierta atenuadora de sonido. Fuente: Aqualimpia Engineering

## 8.5 Sistema eléctrico

Es necesario que el sistema de generación de energía eléctrica cuente con un sistema eléctrico que se encargue de hacer llegar la electricidad generada por el alternador del grupo electrógeno hasta las instalaciones del matadero. El diseño de la instalación eléctrica corresponderá al de un sistema de baja tensión que operará en paralelo con la red y cuyos elementos más importantes serán descritos en este apartado. La operación en paralelo con la red permite:

- Poder emplear la red durante las horas en las cuales no funcione el sistema generador.
- Contar con la seguridad de suministro eléctrico en caso de que el sistema generador deje de funcionar.

Dicho diseño eléctrico debe llevarse a cabo siguiendo la Norma Operativa nº32 del Comité Nacional de Despacho la cual establece los requisitos técnicos mínimos para proyectos de generación y transmisión.

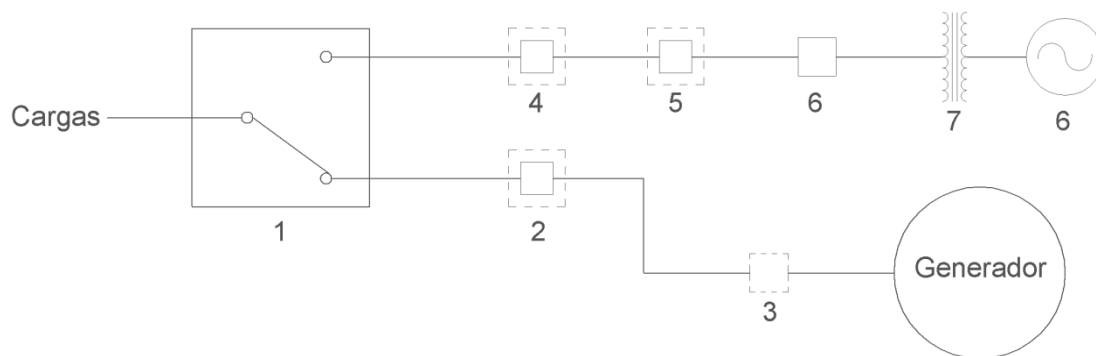


Figura 63: Esquema del sistema eléctrico

1	Interruptor de transferencia	5	Dispositivos de sobrecorriente del alimentador
2	Interruptor de circuito	6	Dispositivos de sobrecorriente del servicio
3	Tablero de distribución de emergencia	7	Transformador de servicio
4	Tablero de distribución normal	8	Red eléctrica

Tabla 44: Componentes que conforman el sistema eléctrico

### 8.5.1 Interruptor de transferencia

El interruptor de transferencia se utiliza para seleccionar el circuito eléctrico del matadero y separarlo de la red eléctrica. De esta forma la maquinaria del matadero pasa a ser la carga que debe alimentar la unidad generadora. Funciona de manera automática controlando la tensión de entrada a las instalaciones durante todo el día. Este interruptor se presenta como un dispositivo opcional que puede ser adquirido junto con el grupo

electrógeno que se ha elegido. Aparece en las especificaciones del mismo bajo las siglas ATS (Automatic Transfer Switch) y debido a la necesidad de operar en paralelo con la red será necesario adquirirlo.

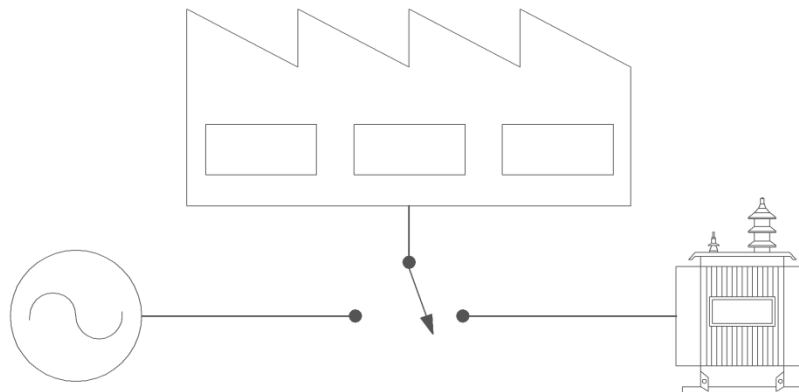


Figura 64: Esquema de funcionamiento del interruptor de transferencia

El interruptor de transferencia funcionará permitiendo que las cargas del matadero sean alimentadas por el grupo electrógeno cuando el mismo se encuentre generando la electricidad requerida por las mismas. El interruptor de transferencia automática detecta cuando el generador está funcionando a la velocidad correcta y cierra de forma segura la línea de servicio al tiempo que abre la línea de alimentación del generador. En cuestión de segundos, el sistema generador comienza a suministrar electricidad a las cargas requeridas. Durante ese tiempo el interruptor de transferencia continúa monitoreando las condiciones de la línea. Cuando se interrumpa el suministro eléctrico, el interruptor de transferencia automática detecta inmediatamente el problema y permite a la red alimentar a las cargas. Esto puede ocurrir bien porque el equipo ha concluido con su labor diaria y se ha apagado o bien por algún fallo en el mismo (parada, generación insuficiente, etc.).

Cuando la carga eléctrica se re-transfiere a la red, el interruptor continúa supervisando las condiciones de la línea para que, en caso de fallo de suministro por parte de la red, el interruptor pueda transferir la carga de nuevo al generador. Por su parte el generador continúa funcionando tras la desconexión durante unos minutos, lo suficiente para que el motor se enfríe. Tras esto, el sistema está listo para operar en caso de que haya una interrupción del suministro eléctrico.

## 8.5.2 Interruptor de circuito

Se trata de un interruptor situado a la salida de la unidad generadora y que mediante su cierre permite el suministro de energía a las cargas por parte de la unidad generadora. Su finalidad es la de proteger el alternador y su instalación es de carácter opcional. En caso de disponer de él, este interruptor debe cerrarse cuando las cargas están

siendo alimentadas por la red de suministro (Antes de que el interruptor de transferencia se haya cerrado), es decir, cuando todas las cargas estén desconectadas del grupo electrógeno.

### 8.5.3 Dispositivos de protección

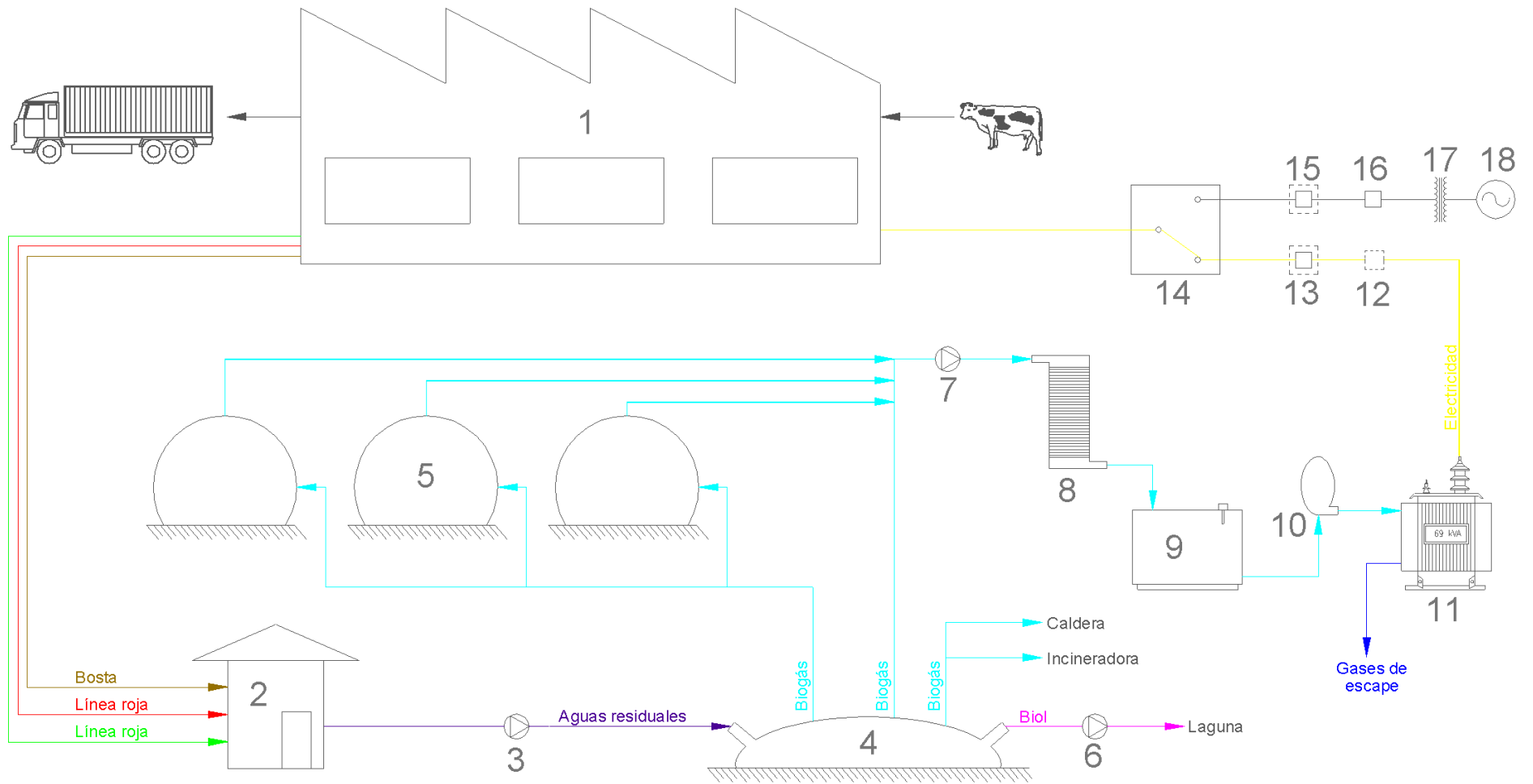
Por un lado, el sistema deberá contar con un tablero de distribución. Los tableros de distribución, también llamados cuadros eléctricos, se encargan de proteger cada uno de los distintos circuitos en los que se divide la instalación empleando fusibles, protecciones magnetotérmicas y protecciones diferenciales. Se recomienda que exista un tablero principal por instalación el cual alimente a uno o más tableros secundarios.

Además, el sistema eléctrico deberá contar con protección contra sobrecorriente. La protección contra sobrecorriente para conductores y equipos tiene el propósito de interrumpir el circuito eléctrico cuando la corriente alcanza un valor que pudiera causar una temperatura excesiva y peligrosa en el conductor o en su aislamiento. Los dispositivos empleados más comúnmente son interruptores y fusibles a los cuales se les exige una serie de requerimientos generales:

- Funcionamiento automático
- Capacidad de transportar a corriente nominal
- Que interrumpan la corriente inmediatamente en caso de sobrecorriente
- Facilidad para ser reemplazados

## 8.6 Esquema final

Se adjunta un esquema final en el cual se puede ver el sistema al completo en el cual intervienen todos los elementos descritos en este apartado:



1	Instalaciones del matadero
2	Cuarto de lodos
3	Bomba de efluente
4	Biodigestor
5	Gasómetros
6	Bomba de efluente

7	Bomba de vacío
8	Filtro de remoción de H <sub>2</sub> S
9	Tanque de almacenamiento
10	Tren de calibración
11	Grupo electrógeno
12	Interruptor de circuito

13	Tablero de distribución
14	Interruptor de transferencia
15	Tablero de distribución
16	Dispositivos de sobrecorriente
17	Transformador
18	Red eléctrica

Figura 65: Esquema final del sistema

## 9. Análisis económico

En este apartado se va a llevar a cabo un análisis económico sencillo que permitirá apreciar la rentabilidad económica del proyecto de generación de electricidad del matadero. Se considerarán como gastos la inversión inicial y los costes operacionales y como beneficio el ahorro conseguido en las facturas eléctricas.

### 9.1 Contexto económico de la generación de electricidad con biogás

El principal factor desfavorable para la generación de electricidad a partir de biogás en Bolivia es que debe competir económicamente con la generación de electricidad a partir de gas natural. El gas natural se ha constituido como el combustible fósil que se emplea mayoritariamente en las plantas eléctricas de Bolivia<sup>78</sup>. Esto se debe a la gran cantidad de reservas del mismo de las que dispone el país, lo cual dota a dicho combustible de un bajo precio de adquisición.

Esta situación energética permite a las compañías eléctricas llevar a cabo una generación económica a partir de gas natural Bolivia, lo cual a su vez les permite vender la energía eléctrica a precios más bajos de los que les permitirían otras fuentes. Esta situación supone un factor desfavorable para la rentabilidad económica del proyecto estudiado ya que la cantidad de dinero que se consiga ahorrar en las facturas gracias a la autogeneración no será muy elevada. Los proyectos que contemplen la venta de electricidad a la red también se ven afectados por el bajo precio del gas natural. Como se pudo apreciar en el apartado 5.4.2, el precio al cual un autogenerador puede vender su energía es muy bajo debido a la situación que se viene comentando. Además dichos proyectos cuentan con el marco legal desfavorable que también fue comentado. En definitiva, los proyectos de autogeneración de electricidad en Bolivia se prevén difíciles de rentabilizar, y más aun si se tiene en cuenta que no existen subvenciones ni ayudas para los mismos por parte del estado.

Otro factor desfavorable para la rentabilidad del proyecto es la necesidad de adquirir componentes de alta calidad en países industrializados. Se trata de una medida que incrementa enormemente la inversión inicial debido al elevado precio de dichos componentes. Además existirán unos costes de importación de los equipos a los cuales habrá que hacer frente. En caso poder adquirir dichos equipos en Bolivia la inversión inicial

<sup>78</sup> Situación que se puede apreciar en el Anexo I.3

sería menor, pero no se contempla esa posibilidad debido a que la tecnología que permite generar electricidad a partir de biogás no está extendida en el país.

Las evaluaciones de factibilidad económica en proyectos de generación eléctrica con biogás son en muchos casos contradictorias. Se pueden encontrar comunicados de prensa e información procedente de productores de biogás que hacen referencia a periodos de recuperación de la inversión de tan solo 1,5 a 2,5 años<sup>79</sup>. Si se tienen en cuenta esos datos de rentabilidad, supondrían ser plantas de biogás en las que el precio de la electricidad generada sería equiparable al de la electricidad suministrada por la red. Por ello, estas cifras no se consideran realistas y solo se podrían lograr en lugares muy concretos en donde el combustible empleado para la generación eléctrica convencional sea extremadamente caro.

Las cifras de rentabilidad más favorables y que pueden ser consideradas realistas fueron determinadas por personal cualificado de la GTZ<sup>80</sup> para plantas medianas y grandes (> 50 kW) en Kenia. Dicha información, prevé períodos de amortización para las plantas, bajo un régimen de tarifas de 0,15 [kWh/US\$], de 6 años en condiciones muy favorables, y de 9 años para las inversiones desfavorables pero todavía viables económicamente. A pesar de estos datos, la generación de electricidad con biogás en África no se ha implantado como podría esperarse que lo hiciera un sistema rentable debido a que muchas plantas no pueden ser instaladas sin contar con apoyo financiero. Además existen otros problemas como la falta de conocimiento, la experiencia, la capacidad local, la financiación inicial y la existencia de barreras políticas, los cuales también pueden darse en Bolivia.

## 9.2 Determinación de la inversión inicial

Se determina la inversión inicial que supondrá el sistema de generación de electricidad con todos sus componentes. Esta será la debida al precio de los diferentes elementos que componen dicho sistema. No se incluyen por tanto los costes que supondrá el sistema de tratamiento de la totalidad de las aguas residuales que genera el matadero municipal de Cochabamba ya que el proyecto de generación de electricidad se ha planteado apoyándose en la existencia de dicho sistema.

El grupo electrógeno y los complementos requeridos para el mismo suponen la mayor parte de la inversión inicial. La elección del grupo electrógeno AQL69 fue llevada a

---

<sup>79</sup> GTZ - Small-scale Electricity Generation from Biomass (Experience with Small-scale Technologies for Basic Energy Supply, Part II)

<sup>80</sup> Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (Sociedad de Cooperación Técnica Alemana)



cabo en el apartado 6.5. Dicho grupo electrógeno tiene un precio indicado en sus especificaciones de 24.640 US\$. Los complementos con los que se puede adquirir el grupo electrógeno y el coste de los mismos figuran en la siguiente tabla:

Accesorio	Precio
Interruptor de red (ATS)	1.260,8 US\$
Sistema recuperador de calor	8.448 US\$
Cubierta de insonorización	3.520 US\$
Sincronización a la red	8000 US\$

Tabla 45: Precio de los accesorios del grupo electrógeno

La adquisición de la cubierta de insonorización y del ATS ya fue justificada<sup>81</sup>. Por otro lado, la elección de un sistema destinado a la cobertura de picos descartó la posibilidad de un sistema de cogeneración<sup>82</sup>. Esta elección hace innecesaria la inversión en un sistema recuperador de calor, por lo que no se considerará su adquisición. De igual manera se descartó la inyección de electricidad a la red, por lo que tampoco se requerirá una sincronización con la misma. El precio total del grupo electrógeno a biogás deberá incluir por tanto los costes del interruptor de red (ATS) y de la cubierta de insonorización.

$$\text{Precio Total Grupo Electrógeno} = 29.420,8 \text{ US\$}$$

El resto de costes a considerar por la inversión inicial serán los relativos al sistema de acondicionamiento y alimentación de combustible y a la habilitación de la ubicación exterior. Se consideran los siguientes costes:

- El filtro de H<sub>2</sub>S que permite adecuar el biogás para ser usado en el grupo electrógeno elegido supone un coste de 5.000 US\$.
- Por su parte el tanque valdrá en torno a 600 US\$ y podrá construirse con materiales locales.
- El precio que supone un tren de calibración varía dependiendo de la distancia que requiera ser transportado el biogás. Se opta por una alternativa pesimista que contempla un coste de 8.500 US\$ para el tren de calibración.
- La necesidad de acondicionar la ubicación exterior para el grupo electrógeno (Cimentación, cubierta, escape, etc.) supondrá unos costes de 1.200 US\$.
- El coste de instalar un entramado de tuberías y cables para la conducción del biogás y la electricidad se estima en 1500 US\$.

<sup>81</sup> Véase apartados 8.4.5 y 8.5.1

<sup>82</sup> Véase apartado 5.4

- Los costes de transporte relevantes son los del filtro y el grupo electrógeno ya que requieren envío internacional. Dichos costes suponen 3.000 US\$.

Los datos expuestos se presentan más ordenadamente de manera tabulada junto al precio que supondrá el grupo electrógeno y sus accesorios. Se determina la inversión inicial requerida para implementar el sistema de generación de electricidad del matadero municipal de Cochabamba:

Inversión Inicial		
Componente	Precio	
Grupo electrógeno	29.420,8	US\$
Filtro H <sub>2</sub> S	5.000	US\$
Tanque de combustible	600	US\$
Tren de calibración	8.500	US\$
Emplazamiento	1.200	US\$
Tuberías y cableado	1.500	US\$
Gastos de envío	3.000	US\$
<b>TOTAL</b>	<b>49.220,8</b>	<b>US\$</b>

Tabla 46: Determinación de la inversión inicial

Los datos permiten estimar una inversión inicial de 49.220,8 US\$, la cual debe ser rentabilizada con el ahorro que se consiga en electricidad gracias a la autogeneración.

## 9.3 Determinación del ahorro anual

Para calcular el ahorro económico que supondrá implementar el sistema generador planteado se debe partir de un valor realista del consumo de energía eléctrica que llevan a cabo las instalaciones del matadero. La importancia de obtener un valor de consumo que sea realista radica en que será este el dato que determine el ahorro en términos energéticos y monetarios. Para el caso del matadero se considera que es adecuado tomar como dato el consumo promedio que establecen las facturas eléctricas del matadero, las cuales fueron objeto de análisis en el apartado 4.2<sup>83</sup>. Dichas facturas establecen un consumo promedio de 7094 [kWh/mes].

La justificación de no emplear los datos del levantamiento de cargas es que dichos datos no son realistas. En el levantamiento de cargas se consideró un día de trabajo del matadero en el cual el consumo es más elevado de lo normal<sup>84</sup>. Esto permitió realizar un análisis correcto del motor ya que se tuvo en cuenta que, en un día cualquiera de trabajo, puede darse dicho consumo. Sin embargo, considerar que dicho consumo va a repetirse a

<sup>83</sup> Se decidió que las facturas que debían ser tenidas en cuenta eran las que se abonaron durante la gestión de "Rada & Asociados" a partir de diciembre de 2011

<sup>84</sup> Consumo de 362,8 [kWh/día]. Véase apartado 6.1

lo largo de los 312 días que opera el matadero en un año<sup>85</sup> no sería realista ya que el matadero no consume tanta electricidad. En ese caso se obtendrían unos ahorros muy elevados y por tanto una mejor rentabilidad, la cual no reflejaría la realidad.

También se requiere conocer el precio de la electricidad en Bolivia para poder determinar el ahorro en términos monetarios. Como fue comentado en el apartado 4.1, la forma de cobro por parte de la distribuidora establece un cobro por potencia suministrada (kW) y otro por energía consumida (kWh). El cobro base debido a la potencia suministrada hace que el precio del kWh no sea adecuado para poder determinar el ahorro en términos monetarios. Existen datos promedio del precio de la energía eléctrica en países latinoamericanos para distintos años, los cuales no se consideran útiles ya que contemplan los precios de más países además de Bolivia. En cualquier caso, se puede obtener un dato promedio del precio de la electricidad empleando las facturas eléctricas del matadero. Se obtiene un precio promedio de 0,47790 [Bs/kWh], que para el cambio de divisas actual<sup>86</sup> equivale a 0,06916 [US\$/kWh].

Meses	Consumo kWh	Costo en Bs	Bs/kWh
<b>Diciembre 2011</b>	6752	3148	0,4662
<b>Enero 2012</b>	7540	3603	0,4779
<b>Febrero 2012</b>	8389	3780	0,4506
<b>Marzo 2012</b>	7358	3498	0,4754
<b>Abril 2012</b>	7601	3592	0,4725
<b>Mayo 2012</b>	8753	3956	0,4519
<b>Junio 2012</b>	6873	3376	0,4911
<b>Julio 2012</b>	6388	3249	0,5086
<b>Agosto 2012</b>	6812	3396	0,4985
<b>Septiembre 2012</b>	6388	3244	0,5077
<b>Octubre 2012</b>	5538	2647	0,4779
<b>Noviembre 2012</b>	7296	3487	0,4779
<b>Diciembre 2012</b>	5963	2850	0,4779
<b>Enero 2013</b>	7662	3497	0,4564
<b>Promedio</b>	<b>7094</b>	<b>3380</b>	<b>0,4779</b>

Tabla 47: Determinación de los valores promedio empleando los datos de las facturas eléctricas

Para determinar el ahorro que se logra en las facturas eléctricas se determina en primer lugar el consumo de energía eléctrica anual. Considerando que se consume un promedio de 7094 [kWh/mes].

$$\text{Consumo anual} = 85128 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

<sup>85</sup> El matadero opera un promedio de 26 días al mes.

<sup>86</sup> BOB/US\$ = 6,901 (Enero 2014)

En el apartado 7.5 se estableció un porcentaje de sustitución de la energía eléctrica de la red por energía eléctrica autogenerada del 92,4 %. Esto permite obtener la energía eléctrica que generará anualmente el sistema a biogás, la cual se evitará tener que pagar.

$$kWh \text{ ahorrados} = 78658,27 \frac{kWh}{año}$$

El ahorro en términos monetarios se obtiene aplicando el precio promedio del kilovatio hora determinado anteriormente de 0,06916 [US\$/kWh].

$$Dinero \text{ ahorrado} = 5440,06 \frac{US\$}{año}$$

Por tanto, para el análisis que se está llevando a cabo, el sistema de generación de energía eléctrica a partir de biogás permitirá al matadero generar 78658,27 [kWh/año], permitiendo cubrir el 92,4 % de su demanda de energía eléctrica. Este hecho le permitirá ahorrar 5440,06 [US\$/año] en facturas eléctricas.

Para calcular el ahorro global que se consigue con el sistema de generación de electricidad se deben considerar los costes de operación del mismo. Dichos costes son debidos principalmente a labores de mantenimiento de tuberías, sustitución de filtros y cambio de aceite del motor de combustión. Se estima que dichos costes ascenderán a 500 [US\$/año]. Descontando estos gastos al ahorro que se logra gracias a la autogeneración de energía eléctrica se obtiene el ahorro anual que nos proporciona el sistema de generación de electricidad.

$$Ahorro \text{ anual} = 4940,06 \frac{US\$}{año}$$

## 9.4 Rentabilidad económica del proyecto

Tras la determinación de la inversión inicial y el ahorro anual, se concluye el análisis económico que permitirá apreciar las posibilidades económicas de implementar el sistema de generación de electricidad en el matadero. Para ello se determinará el periodo de rentabilidad del proyecto que se ha planteado sin tener en cuenta la depreciación del dinero con el paso del tiempo.

En los apartados 9.2 y 9.3 se determinaron respectivamente la inversión inicial que suponía instalar el sistema de generación de electricidad y el ahorro anual que se conseguía con el mismo. Se obtuvieron los siguientes resultados:

$$\text{Inversión inicial} = 49220,8 \text{ US\$}$$

$$\text{Ahorro anual} = 4940,06 \frac{\text{US\$}}{\text{año}}$$

La rentabilidad será el cociente de ambos:

$$\text{Rentabilidad} = \frac{49220,8 \text{ US\$}}{4940,06 \frac{\text{US\$}}{\text{año}}} = 9,96 \text{ años}$$

Se aprecia que el plazo de recuperación de la inversión es de prácticamente 10 años. Dado que el horizonte temporal del proyecto fue establecido en 10 años<sup>87</sup> se considera que el proyecto no es rentable económicamente, por lo que se desaconseja la implementación del sistema de generación de electricidad. Un resultado así era algo que se podía esperar tras ver el contexto económico de la generación de electricidad con biogás en el apartado 9.1. Por tanto, a pesar de que en el proyecto planteado se consigue un porcentaje de sustitución de la electricidad muy alto, el ahorro no es tan grande como para compensar la gran inversión inicial. Además, esta inversión inicial es aun mayor debido a la necesidad de adquirir componentes en el extranjero.

---

<sup>87</sup> Véase apartado 4.3.3



# 10. Conclusiones

En este proyecto final de carrera se ha realizado un estudio de viabilidad de un sistema de generación de energía eléctrica en el matadero municipal de Cochabamba (Bolivia), el cual emplea biogás como combustible. Las principales conclusiones obtenidas son las siguientes:

- El potencial energético de las instalaciones del matadero es muy elevado. Esto se debe a que en el mismo se generan diariamente una enorme cantidad de aguas residuales, las cuales le permiten producir un gas combustible con gran contenido energético: El biogás. Es por ello que el matadero dispone de muchas posibilidades para aprovechar la energía contenida en este gas, lo cual posibilita plantear un proyecto de generación de energía eléctrica.
- El gran potencial de producción de biogás dota al matadero múltiples opciones de generación de energía eléctrica. Todas ellas pasan por emplear un mismo tipo de tecnología, la cual son los motores de combustión interna alternativos. La autonomía y sencillez de los mismos los hacen ser la tecnología más adecuada para la generación con biogás y la más empleada en proyectos de este tipo. Sin embargo, los motores de combustión interna alternativos solo se pueden considerar eficientes en caso de aprovechar el calor de los gases de escape. Al someter al biogás a combustión, gran parte de la energía del mismo se pierde en forma de calor. Si se consigue hacer que el mismo sea un calor útil, la eficiencia del sistema aumenta enormemente y la energía contenida en el biogás se aprovecha al máximo. Esto se puede lograr empleando un sistema de cogeneración que destine el calor de los gases de escape a los procesos que tengan lugar en las instalaciones. Dado que el matadero no requiere calor para realizar sus procesos, no se puede plantear un sistema de cogeneración, y por tanto no se obtendrá toda la energía posible del biogás.
- La opción considerada en el proyecto fue emplear la generación de electricidad para autoabastecer a las instalaciones del matadero con el objetivo de conseguir un ahorro económico en las facturas eléctricas. Se pudo ver que dicha opción era acertada tras obtener un porcentaje de

sustitución de energía eléctrica de la red por energía generada a partir del biogás de más del 90%. Un porcentaje muy elevado que cumple con el objetivo de minimizar el gasto en facturas eléctricas. Sin embargo, considerar el autoconsumo por delante de otras opciones fue una decisión en parte condicionada por los factores desfavorables que ofrecían el resto de sistemas de generación planteados.

- La venta de excedentes a la red eléctrica fue descartada por ser una opción con un contexto desfavorable. Se pudo ver que la legislación Boliviana solo otorga un contexto favorable para la venta de electricidad a los agentes de mercado. Para obtener estos beneficios, el matadero debería crear una empresa paralela cuyo cometido sea la venta de electricidad, lo cual resulta complejo. Además, el bajo precio de venta de la electricidad unido a una mayor inversión inicial para este tipo de proyectos harían del mismo un proyecto inviable económicamente.
- La altitud de Cochabamba aparece como un gran hándicap para la viabilidad técnica y económica del proyecto. El hecho de que la ciudad de Cochabamba se encuentre a 2570 m.s.n.m. impide a los equipos de combustión trabajar en su punto óptimo. Esto hace que los mismos deban ser sobredimensionados para que sean capaces de suministrar la potencia que se les exige. La principal consecuencia de esto es que la generación será menos eficiente que en un emplazamiento a menor altitud, ya que el equipo tendrá que consumir más biogás para generar la misma cantidad de energía eléctrica. Además, la adquisición de un equipo de combustión de mayor potencia y tamaño acarrea un aumento de costes que dificultan la rentabilidad económica del proyecto.
- El grupo electrógeno a biogás que se emplea en el proyecto de generación eléctrica del matadero fue correctamente dimensionado y elegido. Esto se pudo apreciar tras la caracterización del mismo, en la cual se pudo apreciar una buena capacidad para abastecer las cargas del matadero logrando un gran porcentaje de sustitución de la electricidad. Los resultados obtenidos permiten apreciar que el proyecto planteado es técnicamente el más adecuado para las características del matadero.



- El análisis económico desveló que el proyecto más adecuado para las características del matadero no es viable económicamente. Se obtiene una rentabilidad a partir de los diez años, la cual coincide con el horizonte temporal del proyecto. Obtener una mala rentabilidad era un resultado que se podía esperar debido a la situación de Bolivia. El bajo precio del gas natural, la imposibilidad de adquirir la tecnología en el país y la falta de subvenciones para este tipo de proyectos condicionan económicamente al mismo. Quizás sea necesario esperar a que haya un cambio en alguno de estos factores para que el proyecto se pueda llevar a cabo. El incremento de precio de los combustibles fósiles es algo inevitable ya que se trata de recursos finitos, esto podría favorecer las posibilidades de la autogeneración, obteniendo mayores ahorros en las facturas eléctricas o posibilitando la venta de electricidad. Sin embargo, dado que Bolivia cuenta con muchas reservas de gas natural, es algo que no se puede contemplar actualmente. Si hay algo que puede propiciar el desarrollo de este tipo de proyectos es la aparición de subvenciones para los mismos. Estas pueden llegar en forma de financiamiento por parte de los fondos públicos o de la cooperación internacional. Las subvenciones por parte de los fondos públicos son algo que puede tener lugar cuando el estado aprecie las ventajas que le pueden suponer este tipo de proyectos: Ahorro de energía primaria, menores costes de producción y distribución de la energía, seguridad en el suministro de energía eléctrica y disminución de la contaminación y del efecto invernadero.



# Bibliografía

- [1] Joaquín A. Víquez Arias, "Generación eléctrica con biogás", 2010
- [2] Stephanie Lansing, Joaquín Víquez, Helen Martínez, Raúl Botero, Jay Martin, "Quantifying electricity generation and waste transformations in a low-cost, plug-flow anaerobic digestion system", 2008
- [3] Cummins Power Generation, "Manual de Aplicación para Conjuntos Generadores enfriados con Líquido", 2011
- [4] Jaime Martí Herrero, "Biodigestores Familiares. Guía de Diseño y Manual de Instalación", 2008
- [5] Centro de Promoción de Tecnologías Sostenibles (CPTS), "Guía Técnica de Producción Más Limpia para Mataderos de Bovinos", 2005
- [6] Nelson Fumo, Pedro J. Mago, Kenneth Jacobs, "Design considerations for combined cooling, heating, and power systems at altitude", 2011
- [7] Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), "Small-scale Electricity Generation from Biomass (Part II)", 2010
- [8] Motor Challenge Program of the U.S. Department of Energy, "Determining electric motor load and efficiency"
- [9] Joaquín A. Víquez Arias, "Remoción del sulfuro de hidrógeno/ácido sulfhídrico en el biogás", 2010
- [10] Martijn Veen, Jaime Martí Herrero, Fernando Acosta Bedoya, Gonzalo Ameller Terrazas, "Estudio de factibilidad para un programa nacional de biogás doméstico en Bolivia", 2012

- [11] Juan Miguel Mantilla Gonzalez, Borys Javier Aguirre Junco, Luis Andres Sarmiento Pinilla, "Evaluación experimental de un motor encendido por chispa que utiliza biogás como combustible", 2008
  
- [12] Magín Lapuerta, Octavio Armas, John R. Agudelo, Carlos A. Sánchez, "Estudio del Efecto de la Altitud sobre el Comportamiento de Motores de Combustión Interna", 2006
  
- [13] Cristián Guevara Vicuña, "El efecto de la altura en la eficiencia de un motor eléctrico"
  
- [14] Guascor Power, "Energía distribuida. Generación eléctrica y administración de los recursos energéticos en zonas aisladas", 2008
  
- [15] Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, "Guía básica de calderas industriales eficientes", 2012
  
- [16] Jaime Martí Herrero, "Construcción de un biodigestor de laguna cubierta con recorrido eficiente"
  
- [17] Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), "Aprovechamiento de biogás para la generación de energía eléctrica en el sector agropecuario", 2007
  
- [18] Proyecto Energías Renovables No Convencionales en Chile, "Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de biogás", 2007
  
- [19] United Nations Industrial Development Organization, "Navigating Bioenergy. Contributing to informed decision making bioenergy issues", 2009
  
- [20] Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia, "Balance Energético Nacional 2000-2012"
  
- [21] Instituto Nacional de Estadística de Bolivia (INE), "Anuario Estadístico 2011"

# Anexos

## Anexo I - Consumo actual de las fuentes energéticas en Bolivia

### I.1 Energía primaria y secundaria

En Bolivia, la producción de energía primaria<sup>88</sup> está compuesta principalmente por cuatro energéticos: gas natural, petróleo condensado y/o gasolina natural, biomasa e hidroenergía. Para el año 2012 la producción de energía primaria alcanzó los 139.297,10 kbep<sup>89</sup>, superior en 13,8% a la producción de energía primaria del año anterior. De este total, 111.891,97 kbep, correspondió a la producción de gas natural.

FUENTE	2011	2012	Variación (en %)
<b>Petróleo, Condensado y Gasolina Natural</b>	15.938,45	18.875,43	18,4%
<b>Gas Natural</b>	98.354,88	111.891,97	13,8%
<b>Hidroenergía</b>	1.453,89	1.604,50	10,4%
<b>Biomasa</b>	6.661,18	6.925,20	4,0%
<b>Total</b>	<b>122.408,40</b>	<b>139.297,10</b>	<b>13,8%</b>

Tabla 48: Producción de Energía Primaria (en kbep). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia

Teniendo en cuenta la estructura de la producción de energía primaria, la producción de hidrocarburos representa el 93,9% de la producción total de energía, de los cuales 80,3% corresponde a la producción de gas natural.

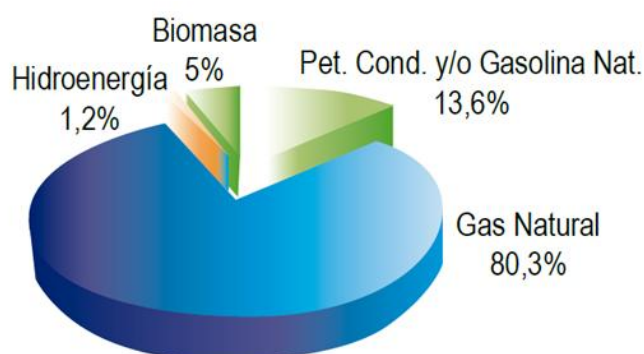


Figura 66: Estructura de la producción de energía primaria en 2012. Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia

Durante la gestión 2012, se exportaron 89.885,53 kbep de energía de los cuales 87.361,23 kbep correspondieron a gas natural y 2.524,30 a Crudo Reconstituido.

<sup>88</sup> Se entiende por energía primaria aquella que es extraída directamente de la naturaleza sin haber sufrido ningún proceso de transformación.

<sup>89</sup> bep = Barril Equivalente de Petróleo

FUENTE	2011	2012	Variación (en %)
Gas Natural	75.274,53	87.361,23	16,1%
Crudo Reconstituido	3.053,49	2.524,30	-17,3%
<b>Total Exportaciones</b>	<b>78.328,02</b>	<b>89.885,53</b>	<b>14,8%</b>

Tabla 49: Exportación de energía primaria (en kbeq). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia

En 2012, se importaron 7.303,09 kbeq de energía, de los cuales 5.625,64 kbeq correspondieron a Diesel Oil, y el resto a otros derivados como Gasolina Especial, GLP, Gasolina de Aviación, Aceites y Grasas.

FUENTE	2011	2012	Variación (en %)
Diesel Oil	4.908,27	5.625,64	14,6%
Gasolina Especial	1.055,56	1.224,19	16,0%
GLP	258,95	293,46	13,3%
Gasolina de Aviación	0,00	0,00	-
Aceites	104,22	157,25	50,9%
Grasas	8,87	2,56	-
<b>Total importaciones</b>	<b>6.335,87</b>	<b>7.303,10</b>	<b>15,3%</b>

Tabla 50: Importación de energía secundaria<sup>90</sup> (en kbeq). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia

Teniendo en cuenta la energía ingresada a los centros de transformación, en 2012, hubo un 3,1% más de ingreso de energía que en el año anterior. La energía ingresada en los Centros de Transformación alcanzó en 2012 los 30.800,27 kbeq, de los cuales 16.804,06 kbeq, correspondieron a Refinerías, 2.010,95 kbeq a Plantas de Gas y 11.985,26 kbeq a Centrales Eléctricas. La mayor cantidad de energía ingresada a las Centrales Eléctricas, correspondió a las Termoeléctricas con 9.540,11 kbeq, seguidas por las hidroeléctricas con 1.604,50 kbeq, la Biomasa con 495,57 kbeq y finalmente por el Diesel con 345,08 kbeq.

FUENTE	2011	2012	Variación (en %)
Refinerías	16.416,83	16.804,06	2,4%
Plantas de Gas	2.003,53	2.010,95	0,4%
Centrales eléctricas	11.440,97	11.985,26	4,8%
Hidroenergía	1.453,89	1.604,50	10,4%
Termoelectricas	9.239,86	9.540,11	3,2%
Biomasa	493,70	495,57	0,4%
Diesel	253,52	345,08	36,1%
<b>Total Centros de Transformación</b>	<b>29.861,32</b>	<b>30.800,27</b>	<b>3,1%</b>

Tabla 51: Centros de transformación de energía primaria (en kbeq). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia

<sup>90</sup> Se entiende por energía secundaria aquella que se obtiene de la transformación de la primaria.

En la gestión 2012, el consumo final total de energía fue de 39.511,37 kbep, superior en un 5,8% al del año anterior, debido fundamentalmente al crecimiento en el consumo en Gas Natural, Diesel Oil y Gasolinas.

FUENTE	2011	2012	Variación (en %)
Gas Natural	8.070,28	8.806,48	9,1%
Biomasa	5.923,48	6.185,63	4,4%
Electricidad	3.921,16	4.097,89	4,5%
GLP	3.001,35	3.035,16	1,1%
Diesel Oil	9.090,72	9.743,75	7,2%
Gasolinas	6.246,95	6.675,69	6,9%
Otros Derivados	1.106,80	966,77	-12,7%
<b>Total</b>	<b>37.360,74</b>	<b>39.511,37</b>	<b>5,8%</b>

Tabla 52: Consumo final de energía por fuentes (en kbep). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia

Teniendo en cuenta la estructura del consumo final de energía por cada una de las fuentes para el año 2012, el Diesel Oil se constituye como la principal fuente de consumo energético, seguido por el gas natural y las gasolinas.

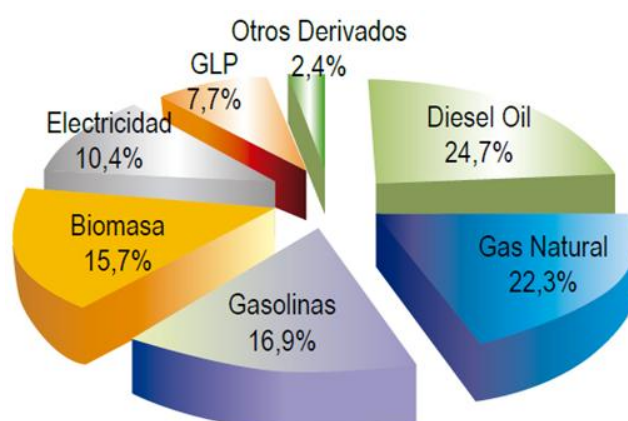


Figura 67: Estructura del consumo final de energía por fuentes 2012. Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia

## I.2 Consumo de energía por sectores

Comparando los consumos finales de energía por sectores, los sectores de mayor crecimiento fueron los sectores Agropecuarios, la Pesca y la Minería así como los sectores del Transporte e Industria.

FUENTE	2011	2012	Variación (en %)
Transporte	15.349,77	16.293,03	6,1%
Industria	9.883,95	10.472,17	6,0%
Residencial	6.815,20	7.090,02	4,0%
Comercial	1.150,70	1.206,97	4,9%
Agro,Pes, Min	4.161,12	4.449,18	6,9%
<b>Total</b>	<b>37.360,74</b>	<b>39.511,37</b>	<b>5,8%</b>

Tabla 53: Consumo final de energía por sectores (en kbp). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia

En resumen, considerando la estructura del Consumo Final de Energía por sector económico en 2012, el sector del Transporte consumió el 41,2% del consumo total de energía, seguido por los sectores industrial, residencial, agropecuario, caza y pesca y el sector comercial.

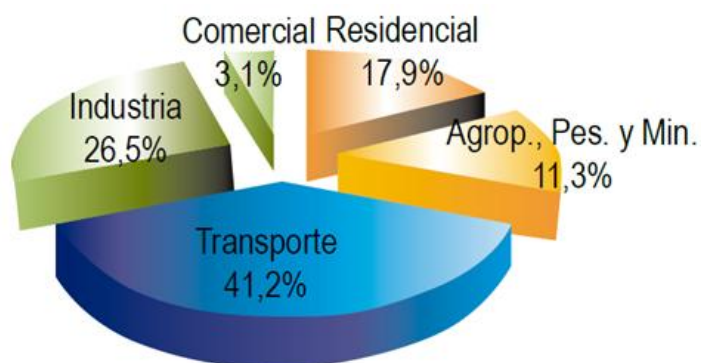


Figura 68: Estructura de consumo final de energía por sector 2012. Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia

El consumo de energía en el sector transporte creció un 6,1% entre 2011 y 2012. Las principales fuentes de consumo de energía para el sector del transporte, fueron la gasolina especial, el diesel oil y el gas natural. El energético de mayor crecimiento en el sector transporte fue la gasolina de aviación con 20,9%. Se observa que el crecimiento del consumo de gas natural en el sector transporte, fue superior al crecimiento del consumo del diesel oil y al crecimiento del consumo de gasolina especial.



FUENTE	2011	2012	Variación (en %)
Gas Natural	3.116,76	3.414,77	9,6%
Gasolina de Aviación	30,70	37,13	20,9%
Gasolina Especial	6.199,11	6.619,12	6,8%
Gasolina Premium	17,14	19,44	13,4%
Jet Fuel	1.058,89	921,46	-13,0%
Diesel Oil	4.927,17	5.281,11	7,2%
<b>TOTAL</b>	<b>15.349,77</b>	<b>16.293,03</b>	<b>6,1%</b>

Tabla 54: Consumo final de energía sector transporte (en kbep). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia

El consumo de energía en el sector industrial creció un 6,0% entre 2011 y 2012. Entre los energéticos más consumidos por el sector industrial, se encuentran el gas natural, la biomasa y la electricidad. Otras fuentes energéticas para la industria lo constituyen el Diesel Oil, el GLP y el Keroseno.

FUENTE	2011	2012	Variación (en %)
Gas Natural	4.336,82	4.681,73	8,0%
Electricidad	1.074,20	1.109,10	3,2%
GLP	81,04	81,95	1,1%
Kerosene	14,37	13,59	-5,4%
Diesel Oil	527,26	565,14	7,2%
Biomasa	3.850,26	4.020,66	4,4%
<b>Total</b>	<b>9.883,95</b>	<b>10.472,17</b>	<b>6,0%</b>

Tabla 55: Consumo final de energía sector industrial (en kbep). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia

El consumo de energía en el sector residencial creció en 4,0% entre 2011 y 2012. Entre los energéticos más consumidos por el sector residencial, se encuentran el GLP, la biomasa y la electricidad. Otras fuentes energéticas para el sector residencial lo constituyen el gas natural y el Keroseno. Cabe destacar la tasa de crecimiento de 19,7% en el consumo de gas natural en el sector residencial entre ambos años.

FUENTE	2011	2012	Variación (en %)
Gas Natural	387,08	463,23	19,7%
Electricidad	1.440,07	1.516,34	5,3%
GLP	2.881,29	2.913,75	1,1%
Kerosene	33,53	31,72	-5,4%
Biomasa	2.073,22	2.164,97	4,4%
<b>TOTAL</b>	<b>6.815,19</b>	<b>7.090,01</b>	<b>4,0%</b>

Tabla 56: Consumo final de energía sector residencial (en kbep). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia

El consumo de energía en el sector comercial creció un 4,9% entre 2011 y 2012. Entre los energéticos más consumidos por el sector comercial, se encuentran la electricidad y el gas natural. Otra fuente energética para el sector comercial lo constituyen el gas licuado de petróleo. Cabe destacar, la tasa de crecimiento del 7,5% en el de consumo de gas natural en el sector comercial entre ambas gestiones.

FUENTE	2011	2012	Variación (en %)
Gas Natural	229,62	246,75	7,5%
Electricidad	882,06	920,76	4,4%
GLP	39,02	39,46	1,1%
<b>TOTAL</b>	<b>1.150,70</b>	<b>1.206,97</b>	<b>4,9%</b>

Tabla 57: Consumo final de energía sector comercial (en kbep). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia

El consumo de energía en el sector Agropecuario, Pesca y Minería creció un 6,9% entre 2011 y 2012. El energético más consumido por este sector es el Diesel Oil, seguido por la electricidad.

FUENTE	2011	2012	Variación (en %)
Electricidad	524,83	551,68	5,1%
Diesel Oil	3.636,29	3.897,50	7,2%
<b>TOTAL</b>	<b>4.161,12</b>	<b>4.449,18</b>	<b>6,9%</b>

Tabla 58: Consumo final de energía sector agrop., pesca y minería (en kbep). Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia

### I.3 Diagrama de flujo

El diagrama posterior resume lo expuesto mostrando a que uso se destinan los cuatro energéticos que llevan a cabo la producción de energía primaria en Bolivia y a que sectores terminan siendo destinados.

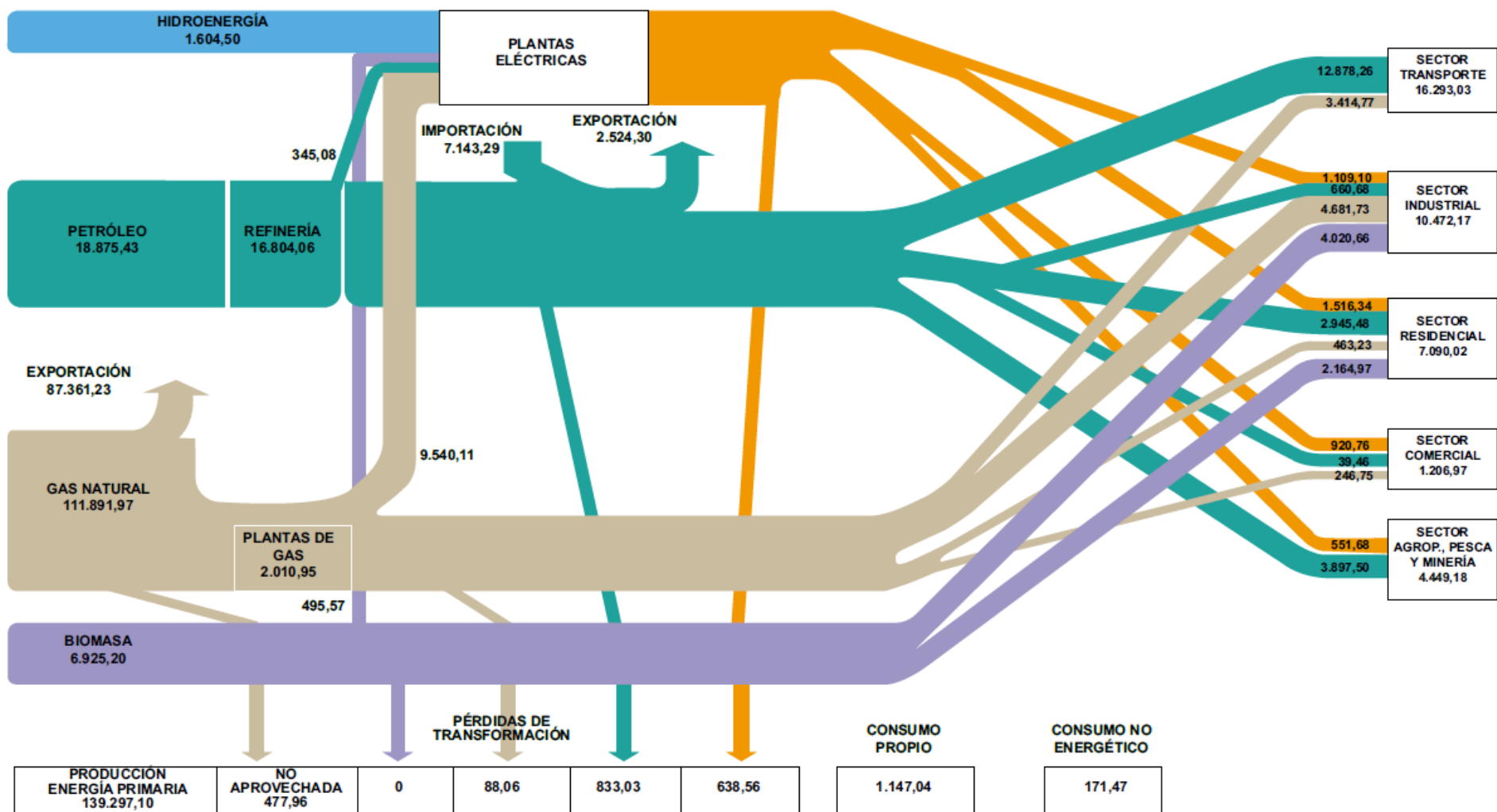


Figura 69: Diagrama de flujo de la energía en Bolivia. Fuente: Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia



## Anexo II - Información demográfica

### II.1 Datos demográficos Departamento de Cochabamba

En la tabla posterior se presentan los datos demográficos correspondientes a la población total del Departamento de Cochabamba según edades simples durante el periodo de 2005 a 2011. Los datos han sido extraídos de la página web del Instituto Nacional de Estadística de Bolivia (INE) y del anuario estadístico publicado por dicha institución.

EDAD	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
	Total	Total	Total	Total	Total	Total	Total
<b>TOTAL</b>	<b>1.671.857</b>	<b>1.709.803</b>	<b>1.747.901</b>	<b>1.786.035</b>	<b>1.824.082</b>	<b>1.861.918</b>	<b>1.899.406</b>
<b>0-4</b>	<b>227.204</b>	<b>228.974</b>	<b>230.366</b>	<b>231.478</b>	<b>232.404</b>	<b>233.242</b>	<b>233.949</b>
0	46.312	46.571	46.739	46.848	46.935	47.033	47.596
1	45.939	46.233	46.440	46.588	46.708	46.830	46.900
2	45.603	45.937	46.180	46.362	46.511	46.655	46.656
3	44.991	45.396	45.733	46.014	46.250	46.454	46.479
4	44.359	44.836	45.274	45.666	46.001	46.270	46.318
<b>5-9</b>	<b>209.730</b>	<b>212.769</b>	<b>215.828</b>	<b>218.766</b>	<b>221.443</b>	<b>223.718</b>	<b>225.508</b>
5	43.318	43.850	44.396	44.920	45.386	45.757	46.004
6	42.620	43.199	43.798	44.376	44.895	45.315	45.608
7	41.938	42.554	43.183	43.790	44.341	44.802	45.153
8	41.264	41.909	42.551	43.167	43.735	44.231	44.646
9	40.590	41.257	41.901	42.513	43.086	43.612	44.097
<b>10-14</b>	<b>192.741</b>	<b>196.357</b>	<b>199.640</b>	<b>202.701</b>	<b>205.648</b>	<b>208.592</b>	<b>211.603</b>
10	40.004	40.699	41.344	41.945	42.506	43.032	43.520
11	39.385	40.080	40.684	41.232	41.758	42.296	42.866
12	38.672	39.379	39.981	40.524	41.055	41.622	42.253
13	37.812	38.551	39.216	39.838	40.445	41.067	41.724
14	36.868	37.648	38.415	39.162	39.884	40.575	41.240
<b>15-19</b>	<b>172.051</b>	<b>176.240</b>	<b>180.860</b>	<b>185.611</b>	<b>190.193</b>	<b>194.307</b>	<b>197.852</b>
15	35.956	36.783	37.653	38.527	39.366	40.131	40.814
16	34.997	35.862	36.828	37.822	38.770	39.600	40.284
17	34.195	35.071	36.074	37.118	38.116	38.979	39.673
18	33.648	34.489	35.437	36.421	37.372	38.222	38.944
19	33.254	34.035	34.868	35.724	36.570	37.375	38.138
<b>20-24</b>	<b>158.373</b>	<b>161.715</b>	<b>164.849</b>	<b>167.956</b>	<b>171.215</b>	<b>174.805</b>	<b>178.898</b>
20	32.809	33.538	34.277	35.027	35.789	36.565	37.372
21	32.397	33.062	33.688	34.311	34.968	35.698	36.542
22	31.857	32.487	33.046	33.593	34.185	34.882	35.736

23	31.103	31.742	32.315	32.875	33.473	34.162	34.984
24	30.208	30.886	31.523	32.152	32.799	33.498	34.264
<b>25-29</b>	<b>137.985</b>	<b>141.740</b>	<b>145.513</b>	<b>149.259</b>	<b>152.935</b>	<b>156.497</b>	<b>159.815</b>
25	29.328	30.036	30.724	31.406	32.093	32.798	33.516
26	28.443	29.185	29.930	30.671	31.400	32.108	32.769
27	27.569	28.334	29.118	29.899	30.656	31.368	31.996
28	26.731	27.504	28.291	29.073	29.831	30.547	31.185
29	25.914	26.682	27.450	28.210	28.954	29.674	30.349
<b>30-34</b>	<b>116.803</b>	<b>120.602</b>	<b>124.350</b>	<b>128.064</b>	<b>131.765</b>	<b>135.470</b>	<b>139.202</b>
30	25.073	25.838	26.593	27.337	28.071	28.795	29.499
31	24.247	25.008	25.746	26.471	27.192	27.920	28.657
32	23.394	24.151	24.885	25.606	26.328	27.063	27.824
33	22.500	23.257	24.006	24.750	25.494	26.244	27.012
34	21.588	22.347	23.121	23.901	24.680	25.448	26.210
<b>35-39</b>	<b>95.393</b>	<b>98.964</b>	<b>102.834</b>	<b>106.859</b>	<b>110.897</b>	<b>114.801</b>	<b>118.553</b>
35	20.679	21.433	22.222	23.029	23.833	24.614	25.371
36	19.804	20.555	21.365	22.202	23.034	23.830	24.581
37	18.994	19.728	20.533	21.374	22.212	23.009	23.757
38	18.279	18.972	19.737	20.540	21.348	22.129	22.876
39	17.637	18.276	18.976	19.714	20.471	21.220	21.968
<b>40-44</b>	<b>79.400</b>	<b>81.863</b>	<b>84.490</b>	<b>87.296</b>	<b>90.296</b>	<b>93.506</b>	<b>97.013</b>
40	16.986	17.566	18.200	18.874	19.575	20.290	21.031
41	16.373	16.900	17.471	18.084	18.734	19.419	20.158
42	15.818	16.298	16.813	17.367	17.966	18.615	19.336
43	15.331	15.780	16.251	16.755	17.303	17.908	18.588
44	14.892	15.319	15.756	16.216	16.717	17.274	17.900
<b>45-49</b>	<b>67.898</b>	<b>69.770</b>	<b>71.557</b>	<b>73.368</b>	<b>75.311</b>	<b>77.494</b>	<b>79.899</b>
45	14.443	14.845	15.242	15.656	16.105	16.611	17.179
46	14.050	14.428	14.787	15.152	15.549	16.004	16.519
47	13.628	13.992	14.328	14.664	15.028	15.447	15.916
48	13.146	13.508	13.846	14.184	14.544	14.946	15.383
49	12.630	12.997	13.353	13.712	14.085	14.486	14.902
<b>50-54</b>	<b>55.897</b>	<b>57.737</b>	<b>59.657</b>	<b>61.620</b>	<b>63.585</b>	<b>65.514</b>	<b>67.327</b>
50	12.105	12.473	12.844	13.220	13.604	13.998	14.388
51	11.620	11.996	12.388	12.788	13.189	13.582	13.950
52	11.154	11.531	11.933	12.344	12.753	13.143	13.495
53	10.717	11.085	11.475	11.875	12.273	12.654	13.003
54	10.301	10.652	11.018	11.393	11.768	12.137	12.490
<b>55-59</b>	<b>45.393</b>	<b>46.891</b>	<b>48.428</b>	<b>50.010</b>	<b>51.642</b>	<b>53.330</b>	<b>55.091</b>
55	9.877	10.210	10.551	10.899	11.251	11.606	11.961

56	9.484	9.802	10.120	10.442	10.773	11.117	11.478
57	9.088	9.388	9.688	9.992	10.309	10.644	11.005
58	8.678	8.960	9.251	9.553	9.867	10.196	10.546
59	8.267	8.531	8.818	9.124	9.443	9.767	10.101
<b>60-64</b>	<b>36.251</b>	<b>37.286</b>	<b>38.526</b>	<b>39.901</b>	<b>41.339</b>	<b>42.771</b>	<b>44.185</b>
60	7.906	8.155	8.442	8.754	9.076	9.396	9.713
61	7.500	7.731	8.017	8.337	8.667	8.985	9.286
62	7.163	7.373	7.642	7.947	8.264	8.566	8.851
63	6.927	7.113	7.340	7.595	7.863	8.132	8.397
64	6.755	6.915	7.085	7.268	7.470	7.693	7.938
<b>65-69</b>	<b>30.661</b>	<b>31.276</b>	<b>31.682</b>	<b>32.029</b>	<b>32.468</b>	<b>33.151</b>	<b>34.112</b>
65	6.619	6.768	6.900	7.033	7.185	7.375	7.608
66	6.462	6.583	6.654	6.711	6.793	6.935	7.149
67	6.233	6.339	6.380	6.399	6.442	6.554	6.748
68	5.885	5.996	6.053	6.093	6.151	6.262	6.434
69	5.463	5.591	5.695	5.793	5.897	6.025	6.173
<b>70-74</b>	<b>21.646</b>	<b>22.441</b>	<b>23.412</b>	<b>24.446</b>	<b>25.428</b>	<b>26.244</b>	<b>26.802</b>
70	5.033	5.186	5.349	5.517	5.683	5.841	5.979
71	4.623	4.794	5.006	5.231	5.444	5.619	5.731
72	4.260	4.437	4.670	4.922	5.156	5.335	5.434
73	3.980	4.141	4.349	4.573	4.784	4.949	5.047
74	3.751	3.883	4.038	4.202	4.361	4.500	4.610
<b>75-79</b>	<b>14.557</b>	<b>14.922</b>	<b>15.225</b>	<b>15.527</b>	<b>15.887</b>	<b>16.367</b>	<b>17.019</b>
75	3.437	3.542	3.655	3.774	3.899	4.025	4.154
76	3.217	3.294	3.358	3.422	3.499	3.602	3.743
77	2.962	3.021	3.055	3.084	3.131	3.218	3.361
78	2.646	2.703	2.739	2.770	2.817	2.898	3.029
79	2.295	2.362	2.419	2.476	2.542	2.624	2.732
<b>80 y +</b>	<b>9.874</b>	<b>10.254</b>	<b>10.683</b>	<b>11.144</b>	<b>11.625</b>	<b>12.109</b>	<b>12.577</b>

Tabla 59: Población total departamento de Cochabamba según edades simples. Periodo 2005-2011. Fuente: Instituto Nacional de Estadística de Bolivia

## II.2 Datos demográficos provincia de Cercado

En la tabla posterior se presentan los datos demográficos correspondientes a la población total de la provincia de Cercado (Departamento de Cochabamba) según edades simples durante el periodo de 2000 a 2010. Los datos han sido extraídos de la página web del Instituto Nacional de Estadística de Bolivia (INE) y del anuario estadístico publicado por dicha institución.

EDA D	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
	Total	Total	Total	Total	Total	Total	Total	Total	Total	Total	Total
<b>TOTAL</b>	<b>530.909</b>	<b>540.779</b>	<b>550.498</b>	<b>560.034</b>	<b>569.277</b>	<b>578.219</b>	<b>586.857</b>	<b>595.254</b>	<b>603.342</b>	<b>661.068</b>	<b>618.386</b>
<b>0-4</b>	<b>65.016</b>	<b>65.345</b>	<b>65.764</b>	<b>66.161</b>	<b>66.469</b>	<b>66.603</b>	<b>66.543</b>	<b>66.353</b>	<b>66.062</b>	<b>65.702</b>	<b>65.293</b>
0	13.203	13.238	13.295	13.350	13.387	13.388	13.347	13.277	13.187	13.086	12.984
1	13.092	13.141	13.209	13.274	13.321	13.332	13.302	13.243	13.164	13.073	12.978
2	13.000	13.065	13.153	13.238	13.302	13.328	13.310	13.262	13.192	13.109	13.021
3	12.893	12.976	13.075	13.169	13.245	13.286	13.289	13.268	13.277	13.169	13.098
4	12.828	12.925	13.032	13.131	13.214	13.269	13.295	13.303	13.293	13.265	13.212
<b>5-9</b>	<b>59.036</b>	<b>59.846</b>	<b>60.414</b>	<b>60.820</b>	<b>61.144</b>	<b>61.477</b>	<b>61.842</b>	<b>62.180</b>	<b>62.456</b>	<b>62.630</b>	<b>62.666</b>
5	12.250	12.378	12.452	12.491	12.515	12.547	12.592	12.637	12.671	12.683	12.664
6	12.008	12.154	12.243	12.263	12.334	12.380	12.442	12.503	12.554	12.583	12.578
7	11.783	11.946	12.056	12.132	12.191	12.256	12.331	12.403	12.163	12.502	12.511
8	11.582	11.762	11.896	12.000	12.086	12.171	12.257	12.336	12.400	12.445	12.466
9	11.413	11.606	11.767	11.902	12.017	12.123	12.220	12.301	12.367	12.416	12.448
<b>10-14</b>	<b>56.067</b>	<b>57.137</b>	<b>58.251</b>	<b>59.335</b>	<b>60.316</b>	<b>61.139</b>	<b>61.777</b>	<b>62.276</b>	<b>62.668</b>	<b>63.000</b>	<b>63.302</b>
10	11.256	11.465	11.660	11.837	11.992	12.125	12.233	12.317	12.382	12.429	12.463
11	11.092	11.317	11.549	11.772	11.969	12.127	12.239	12.313	12.363	12.402	12.441
12	11.055	11.284	11.534	11.781	12.001	12.177	12.297	12.376	12.430	12.475	12.527
13	11.201	11.417	11.652	11.888	12.103	12.283	12.421	12.530	12.617	12.694	12.768
14	11.462	11.654	11.856	12.057	12.250	12.426	12.587	12.740	12.877	12.999	13.103
<b>15-19</b>	<b>60.305</b>	<b>61.054</b>	<b>61.786</b>	<b>62.535</b>	<b>63.333</b>	<b>64.197</b>	<b>65.210</b>	<b>66.348</b>	<b>67.477</b>	<b>68.510</b>	<b>69.323</b>
15	11.701	11.871	12.043	12.216	12.391	12.566	12.751	12.948	13.135	13.304	13.437
16	11.932	12.078	12.216	12.357	12.509	12.679	12.887	13.126	13.362	13.576	13.736
17	12.125	12.258	12.380	12.505	12.647	12.815	13.033	13.292	13.552	13.788	13.956
18	12.246	12.387	12.521	12.660	12.813	12.985	13.195	13.437	13.680	13.904	14.081
19	12.300	12.460	12.625								
<b>20-24</b>	<b>60.264</b>	<b>61.308</b>	<b>62.429</b>	<b>63.571</b>	<b>64.653</b>	<b>65.617</b>	<b>66.408</b>	<b>67.083</b>	<b>67.717</b>	<b>68.375</b>	<b>69.122</b>
20	12.341	12.517	12.706	12.903	13.099	13.284	13.460	13.631	13.798	13.963	14.125



21	12.378	12.571	12.788	13.015	13.232	13.424	13.579	13.710	13.835	13.967	14.118
22	12.254	12.463	12.700	12.945	13.175	13.370	13.515	13.625	13.725	13.837	13.981
23	11.900	12.126	12.367	12.611	12.837	13.033	13.183	13.301	13.409	13.524	13.667
24	11.191	11.613	11.868	12.097	12.310	12.506	12.672	12.816	12.951	13.085	13.232
<b>25-29</b>	<b>49.152</b>	<b>50.481</b>	<b>51.643</b>	<b>52.694</b>	<b>53.679</b>	<b>54.671</b>	<b>55.657</b>	<b>56.619</b>	<b>57.533</b>	<b>58.381</b>	<b>59.147</b>
25	10.873	11.127	11.360	11.577	11.779	11.973	12.152	12.317	12.473	12.623	12.772
26	10.325	10.593	10.822	11.024	11.213	11.406	11.598	11.787	11.966	12.132	12.283
27	9.790	10.065	10.292	10.489	10.674	10.868	11.071	11.275	11.469	11.647	11.799
28	9.306	9.577	9.810	10.017	10.213	10.413	10.620	10.825	11.022	11.200	11.356
29	8.858	9.119	9.360	9.586	9.800	10.011	10.216	10.415	10.604	10.779	10.937
<b>30-34</b>	<b>37.739</b>	<b>38.853</b>	<b>40.051</b>	<b>41.274</b>	<b>42.464</b>	<b>43.574</b>	<b>44.597</b>	<b>45.559</b>	<b>46.493</b>	<b>47.369</b>	<b>48.224</b>
30	8.393	8.643	8.889	9.129	9.358	9.577	9.782	9.975	10.160	10.332	10.494
31	7.922	8.160	8.413	8.669	8.914	9.140	9.344	9.532	9.712	9.880	10.045
32	7.493	7.718	7.969	8.229	8.480	8.709	7.912	9.099	9.278	9.447	9.616
33	7.125	7.334	7.570	7.816	8.058	8.282	8.486	8.678	8.866	9.044	9.220
34	6.807	6.998	7.210	7.432	7.654	7.866	8.072	8.275	8.476	8.667	8.849
<b>35-39</b>	<b>30.085</b>	<b>30.801</b>	<b>31.549</b>	<b>32.335</b>	<b>33.174</b>	<b>34.060</b>	<b>35.033</b>	<b>36.078</b>	<b>37.149</b>	<b>38.187</b>	<b>39.145</b>
35	6.498	6.671	6.858	7.055	7.257	7.457	7.662	7.872	8.083	8.284	8.472
36	6.196	6.350	6.515	6.688	6.872	7.062	7.267	7.485	7.707	7.919	8.112
37	5.951	6.090	6.235	6.387	6.553	6.731	6.931	7.150	7.375	7.592	7.787
38	5.781	5.909	6.040	6.177	6.327	6.493	6.682	6.890	7.105	7.316	7.510
39	5.659	5.781	5.902	6.027	6.164	6.317	6.491	6.681	6.878	7.076	7.265
<b>40-44</b>	<b>26.329</b>	<b>26.869</b>	<b>27.364</b>	<b>27.857</b>	<b>28.378</b>	<b>28.975</b>	<b>29.630</b>	<b>30.332</b>	<b>31.068</b>	<b>31.855</b>	<b>32.683</b>
40	5.547	5.662	5.771	5.882	6.002	6.140	6.297	6.469	6.648	6.833	7.015
41	5.459	5.568	5.665	5.763	5.868	5.992	6.133	6.288	6.451	6.624	6.802
42	5.329	5.434	5.526	5.616	5.713	5.827	5.955	6.094	6.240	6.399	6.569
43	5.123	5.228	5.322	5.415	5.511	5.622	5.740	5.864	5.995	6.139	6.295
44	4.871	4.978	5.080	5.181	5.284	5.394	5.505	5.618	5.733	5.861	6.002
<b>45-49</b>	<b>21.211</b>	<b>21.770</b>	<b>22.344</b>	<b>22.925</b>	<b>23.489</b>	<b>24.018</b>	<b>24.497</b>	<b>24.934</b>	<b>25.355</b>	<b>25.811</b>	<b>26.332</b>
45	4.635	4.743	4.850	4.958	5.064	5.171	5.274	5.374	5.474	5.584	5.709
46	4.399	4.510	4.625	4.743	4.857	4.964	5.059	5.145	5.228	5.320	5.429
47	4.196	4.309	4.429	4.552	4.670	4.777	4.868	4.947	5.021	5.103	5.200
48	4.048	4.161	4.280	4.400	4.516	4.621	4.714	4.796	4.873	4.955	5.049
49	3.934	4.047	4.160	4.272	4.381	4.485	4.582	4.672	4.760	4.850	4.946
<b>50-54</b>	<b>17.658</b>	<b>18.181</b>	<b>18.660</b>	<b>19.127</b>	<b>19.600</b>	<b>20.084</b>	<b>20.602</b>	<b>21.131</b>	<b>21.661</b>	<b>22.175</b>	<b>22.659</b>
50	3.817	3.928	4.033	4.135	4.237	4.336	4.437	4.535	4.632	4.728	4.825
51	3.710	3.821	3.920	4.014	4.109	4.207	4.313	4.421	4.529	4.634	4.733

52	3.574	3.682	3.776	3.865	3.956	4.053	4.161	4.274	4.388	4.497	4.596
53	3.386	3.488	3.579	3.668	3.760	3.855	3.960	4.070	4.180	4.286	4.383
54	3.170	3.263	3.353	3.445	3.538	3.632	3.732	3.831	3.932	4.030	4.123
<b>55-59</b>	<b>13.267</b>	<b>13.584</b>	<b>13.950</b>	<b>14.363</b>	<b>14.782</b>	<b>15.192</b>	<b>15.592</b>	<b>15.992</b>	<b>16.396</b>	<b>16.803</b>	<b>17.216</b>
55	2.966	3.049	3.136	3.229	3.323	3.414	3.506	3.598	3.689	3.779	3.868
56	2.760	2.835	2.922	3.019	3.115	3.207	3.293	3.376	3.458	3.540	3.625
57	2.596	2.662	2.743	2.836	2.928	3.015	3.095	3.172	3.248	3.325	3.407
58	2.499	2.553	2.618	2.695	2.773	2.850	2.924	2.998	3.074	3.151	3.231
59	2.446	2.486	2.531	2.585	2.642	2.705	2.774	2.848	2.927	3.006	3.085
<b>60-64</b>	<b>11.221</b>	<b>11.321</b>	<b>11.395</b>	<b>11.471</b>	<b>11.584</b>	<b>11.766</b>	<b>12.027</b>	<b>12.343</b>	<b>12.700</b>	<b>13.064</b>	<b>13.409</b>
60	2.390	2.419	2.449	2.483	2.524	2.575	2.640	2.714	2.795	2.877	2.955
61	2.343	2.358	2.367	2.376	2.395	2.432	2.492	2.566	2.652	2.737	2.815
62	2.276	2.286	2.285	2.282	2.290	2.318	2.372	2.442	2.523	2.605	2.679
63	2.170	2.186	2.194	2.201	2.215	2.244	2.290	2.347	2.413	2.481	2.545
64	2.041	2.072	2.101	2.130	2.160	2.196	2.234	2.273	2.316	2.363	2.415
<b>65-69</b>	<b>8.689</b>	<b>8.990</b>	<b>9.323</b>	<b>9.667</b>	<b>9.970</b>	<b>10.214</b>	<b>10.351</b>	<b>10.421</b>	<b>10.464</b>	<b>10.536</b>	<b>10.683</b>
65	1.921	1.968	2.018	2.069	2.118	2.163	2.197	2.224	2.251	2.284	2.326
66	1.800	1.862	1.933	2.007	2.073	2.124	2.149	2.158	2.161	2.171	2.200
67	1.703	1.774	1.855	1.941	2.014	2.068	2.089	2.090	2.081	2.080	2.102
68	1.648	1.715	1.789	1.866	1.932	1.982	2.007	2.015	2.015	2.021	2.044
69	1.617	1.672	1.728	1.784	1.833	1.876	1.909	1.935	1.956	1.980	2.010
<b>70-74</b>	<b>7.270</b>	<b>7.431</b>	<b>7.537</b>	<b>7.615</b>	<b>7.712</b>	<b>7.862</b>	<b>8.108</b>	<b>8.407</b>	<b>8.723</b>	<b>9.014</b>	<b>9.243</b>
70	1.580	1.624	1.662	1.696	1.729	1.767	1.811	1.858	1.905	1.951	1.993
71	1.548	1.582	1.602	1.617	1.635	1.666	1.719	1.784	1.853	1.916	1.965
72	1.490	1.517	1.527	1.531	1.541	1.568	1.624	1.698	1.777	1.848	1.900
73	1.390	1.416	1.429	1.436	1.449	1.476	1.527	1.592	1.663	1.727	1.774
74	1.262	1.293	1.316	1.336	1.358	1.386	1.427	1.475	1.525	1.572	1.611
<b>75-79</b>	<b>4.573</b>	<b>4.710</b>	<b>4.875</b>	<b>5.041</b>	<b>5.203</b>	<b>5.340</b>	<b>5.440</b>	<b>5.521</b>	<b>5.602</b>	<b>5.697</b>	<b>5.832</b>
75	1.142	1.169	1.194	1.216	1.240	1.267	1.298	1.331	1.367	1.403	1.439
76	1.022	1.052	1.086	1.119	1.152	1.180	1.200	1.217	1.234	1.254	1.282
77	906	937	976	1.016	1.054	1.082	1.096	1.103	1.108	1.118	1.142
78	800	828	865	903	940	968	982	990	997	1.008	1.030
79	702	725	755	786	817	844	863	879	896	914	939
<b>80 y +</b>	<b>3.030</b>	<b>3.101</b>	<b>3.166</b>	<b>3.242</b>	<b>3.327</b>	<b>3.430</b>	<b>3.543</b>	<b>3.675</b>	<b>3.815</b>	<b>3.957</b>	<b>4.103</b>

Tabla 60: Población total provincia cercado (Departamento de Cochabamba) según edades simples. Periodo 2000-2010. Fuente: Instituto Nacional de Estadística de Bolivia

## II.3 Datos demográficos provincias del Departamento de Cochabamba

En la tabla posterior se presentan los datos demográficos correspondientes a la población total de las distintas provincias que componen el Departamento de Cochabamba durante el periodo de 2009 a 2011. Los datos han sido extraídos de la página web del Instituto Nacional de Estadística de Bolivia (INE) y del anuario estadístico publicado por dicha institución.

DEPARTAMENTO, PROVINCIA Y SECCIÓN DE PROVINCIA (MUNICIPIO)	2009	2010	2011
	<b>Total</b>	<b>Total</b>	<b>Total</b>
<b>TOTAL BOLIVIA</b>	<b>10.227.299</b>	<b>10.426.155</b>	<b>10.624.495</b>
<b>COCHABAMBA</b>	<b>1.824.086</b>	<b>1.861.924</b>	<b>1.899.406</b>
<b>Cercado</b>	<b>611.068</b>	<b>618.384</b>	<b>631.304</b>
Primera Sección - Cochabamba	611.068	618.384	631.304
<b>Narciso Campero</b>	<b>42.881</b>	<b>43.290</b>	<b>44.116</b>
Primera Sección - Aiquile	31.383	31.790	32.396
Segunda Sección - Pasorapa	4.429	4.358	4.441
Tercera Sección - Omereque	7.069	7.142	7.278
<b>Ayopaya</b>	<b>65.570</b>	<b>65.602</b>	<b>66.851</b>
Primera Sección - Ayopaya	24.420	23.906	24.361
Segunda Sección - Morochata	41.150	41.696	42.490
<b>Esteban Arce</b>	<b>33.859</b>	<b>33.887</b>	<b>34.589</b>
Primera Sección - Tarata	9.092	9.105	9.294
Segunda Sección - Anzaldo	8.562	8.440	8.615
Tercera Sección - Arbieto	10.731	10.802	11.026
Cuarta Sección - Sacabamba	5.474	5.540	5.655
<b>Arani</b>	<b>25.107</b>	<b>25.136</b>	<b>25.645</b>
Primera Sección - Arani	9.902	9.609	9.804
Segunda Sección - Vacas	15.205	15.527	15.841
<b>Arque</b>	<b>28.437</b>	<b>28.869</b>	<b>29.422</b>
Primera Sección - Arque	13.883	14.090	14.360
Segunda Sección - Tacopaya	14.554	14.779	15.062
<b>Capinota</b>	<b>26.831</b>	<b>26.850</b>	<b>27.385</b>
Primera Sección - Capinota	18.066	18.106	18.466
Segunda Sección - Santiviáñez	6.693	6.716	6.850
Tercera Sección - Sicaya	2.072	2.028	2.069
<b>Germán Jordán</b>	<b>35.205</b>	<b>35.330</b>	<b>36.079</b>
Primera Sección - Cliza	21.725	21.735	22.195
Segunda Sección - Toco	6.339	6.255	6.388
Tercera Sección - Tolata	7.141	7.340	7.496
<b>Quillacollo</b>	<b>376.501</b>	<b>393.408</b>	<b>401.317</b>
Primera Sección - Quillacollo	139.259	142.724	145.594
Segunda Sección - Sipe Sipe	43.208	44.463	45.357
Tercera Sección - Tiquipaya	83.650	91.318	93.155
Cuarta Sección - Vinto	42.574	43.699	44.577
Quinta Sección - Colcapirhua	67.810	71.204	72.635
<b>Chapare</b>	<b>247.253</b>	<b>253.777</b>	<b>258.774</b>
Primera Sección - Sacaba	173.019	179.847	183.386

Segunda Sección - Colomi	17.959	17.988	18.342
Tercera Sección - Villa Tunari	56.275	55.942	57.046
<b>Tapacarí</b>	<b>32.728</b>	<b>33.402</b>	<b>34.050</b>
Primera Sección - Tapacarí	32.728	33.402	34.050
<b>Carrasco</b>	<b>159.764</b>	<b>164.844</b>	<b>167.975</b>
Primera Sección - Totora	11.296	10.963	11.171
Segunda Sección - Pojo	19.625	20.654	21.046
Tercera Sección - Pocona	13.102	12.893	13.136
Cuarta Sección - Chimoré	23.330	24.331	24.795
Quinta Sección - Puerto Villarroel	54.599	56.208	57.276
Sexta Sección - Entre Ríos	37.812	39.795	40.550
<b>Mizque</b>	<b>44.086</b>	<b>44.784</b>	<b>45.635</b>
Primera Sección - Mizque	32.945	33.523	34.161
Segunda Sección - Vila Vila	4.867	4.853	4.945
Tercera Sección - Alalay	6.274	6.408	6.530
<b>Punata</b>	<b>47.077</b>	<b>46.546</b>	<b>47.528</b>
Primera Sección - Punata	24.246	23.725	24.225
Segunda Sección - Villa Rivero	5.536	5.429	5.544
Tercera Sección - San Benito	12.665	12.504	12.768
Cuarta Sección - Tacachi	2.822	3.105	3.171
Quinta Sección - Cuchumuela	1.808	1.783	1.821
<b>Bolívar</b>	<b>10.008</b>	<b>10.100</b>	<b>10.301</b>
Primera Sección - Bolívar	10.008	10.100	10.301
<b>Tiraque</b>	<b>37.712</b>	<b>37.715</b>	<b>38.435</b>
Primera Sección - Tiraque	37.712	37.715	38.435

Tabla 61: Población total según provincia y sección de provincia. Periodo 2009-2011. Fuente: Instituto Nacional de Estadística de Bolivia

## Anexo III - Análisis de la demanda de energía eléctrica

### III.1 Correlación lineal estadística

En probabilidad y estadística, la correlación indica la fuerza y la dirección de una relación lineal y proporcionalidad entre dos variables estadísticas. Se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra: si tenemos dos variables (A y B) existe correlación si al aumentar los valores de A lo hacen también los de B y viceversa. La correlación entre dos variables no implica, por sí misma, ninguna relación de causalidad. Existen diversos coeficientes que miden el grado de correlación adaptados a la naturaleza de los datos. El más conocido es el coeficiente de correlación de Pearson.

En estadística, el coeficiente de correlación de Pearson es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. En el caso de que se esté estudiando dos variables aleatorias  $x$  e  $y$  sobre una población estadística; el coeficiente de correlación de Pearson se simboliza con la letra  $\rho_{x,y}$  siendo la expresión que nos permite calcularlo la siguiente:

$$\rho_{x,y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y}$$

Donde:

- $\sigma_{XY}$  es la covarianza de (X,Y)
- $\sigma_X$  es la desviación típica de la variable X
- $\sigma_Y$  es la desviación típica de la variable Y
- $\mu_X$  es la media de la variable X
- $\mu_Y$  es la media de la variable Y

De manera análoga podemos calcular este coeficiente con una medida cuantitativa  $r_{xy}$  a partir de un conjunto de datos de una muestra mediante la siguiente expresión:

$$r_{xy} = \frac{\sum x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{n s_X s_Y} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}$$

El valor del coeficiente de correlación de Pearson varía en el intervalo  $[-1,1]$ . Cuanto más próximo a 0 sea  $r$  menor será la relación entre los datos, y cuanto más próximo a 1 (en valor absoluto) mayor será dicha relación. Su signo indica si se da una relación positiva o negativa entre las variables  $x$  e  $y$ :

- Si  $r = 1$ , existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada relación directa. Cuando una de las variables aumenta, la otra también lo hace en proporción constante.
- Si  $0 < r < 1$ , existe una correlación positiva. Un crecimiento de la variable  $X$  propiciará un crecimiento de la variable  $Y$ .
- Si  $r = 0$ , no existe relación lineal. Esto no necesariamente implica que las variables sean independientes ya que pueden existir relaciones no lineales entre las dos variables.
- Si  $-1 < r < 0$ , existe una correlación negativa. Un crecimiento de la variable  $X$  propiciará un decrecimiento de la variable  $Y$ .
- Si  $r = -1$ , existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada relación inversa. Cuando una de las variables aumenta, la otra disminuye en proporción constante.

A partir del coeficiente de correlación se puede obtener el coeficiente de determinación. Comúnmente se define el coeficiente de determinación como el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson. Dicho coeficiente permite medir la variabilidad de los datos y suele expresarse en términos de tanto por ciento.

Existe una manera más simple de comprobar que existe correlación entre dos variables y es mediante un diagrama de dispersión. Un diagrama de dispersión es un tipo de diagrama matemático que utiliza las coordenadas cartesianas para mostrar los valores de dos variables para un conjunto de datos. Los datos se muestran como un conjunto de puntos, cada uno con el valor de una variable que determina la posición en el eje horizontal y el valor de la otra variable determinado por la posición en el eje vertical. Interpretando el diagrama se puede apreciar a simple vista si existe o no correlación y el signo de la misma.

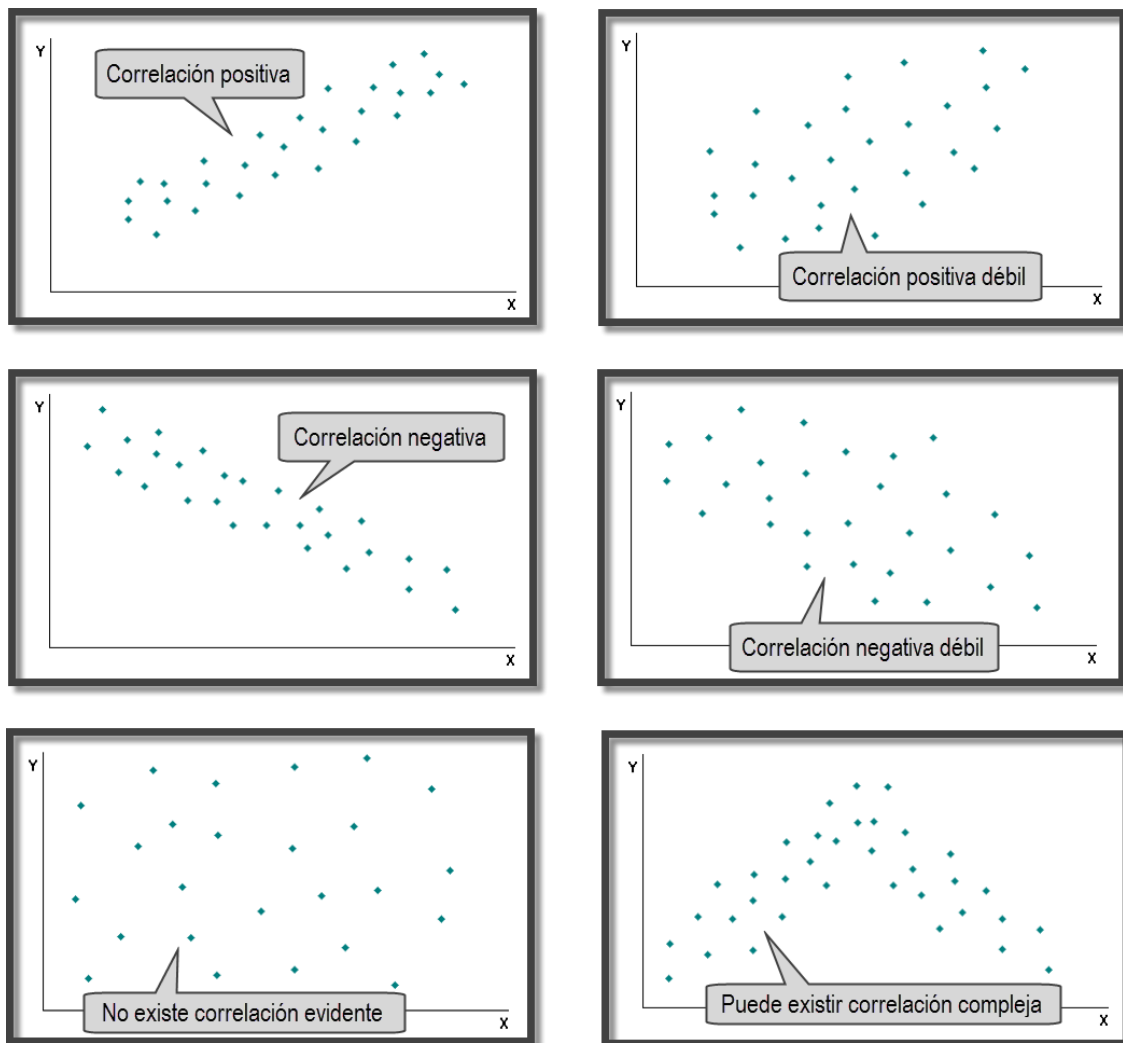


Figura 70: Diagramas de dispersión para distintos casos de correlación

### III.2 Correlación entre faeneo y consumo

Ae aplicará la teoría expuesta en el Anexo II.1 para medir cuan relacionadas están las variables designadas como "Faeneo" y "Consumo" las cuales son ambas variables cuantitativas:

- El faeneo indica las vacas que son procesadas mensualmente en el matadero con el propósito de producir carne. Dicha variable se mide en [reses/mes].
- El consumo indica los kWh de energía eléctrica consumidos mensualmente en el matadero. Dicha variable se mide en [kWh/mes].

Se pretende comprobar que existe una correlación directa entre dichas variables para demostrar que el número de vacas procesadas y el consumo eléctrico están relacionados. Demostrando esta relación se podrá dar una estimación válida de cuantos KWh supone procesar una res.

Se tomarán la mayor cantidad de datos posibles, lo cual incluirá los datos de los primeros meses de 2013 ya que para que el cálculo del coeficiente de correlación sea lo más acertado posible el tamaño muestral debe de ser grande. Los datos que muestran el faeneo y el consumo de los últimos meses son los siguientes:

Meses	Faeneo [reses/mes]	Consumo [kWh/mes]
Ene-12	7541	7540
Feb-12	7386	8389
Mar-12	8083	7358
Abr-12	6360	7001
May-12	7148	8753
Jun-12	6823	6873
Jul-12	6372	6388
Ago-12	7419	6812
Sep-12	6761	6388
Oct-12	6938	5538
Nov-12	7277	7296
Dic-12	8138	5963
Ene-13	7681	7662
Feb-13	6933	8632
Mar-13	6717	7540
Abr-13	5957	5963
May-13	6132	6206
Jun-13	6489	6206
Jul-13	7351	6570
Ago-13	7386	7419

Tabla 62: Muestras de faeneo y consumo

El diagrama de dispersión de estos datos se muestra a continuación:

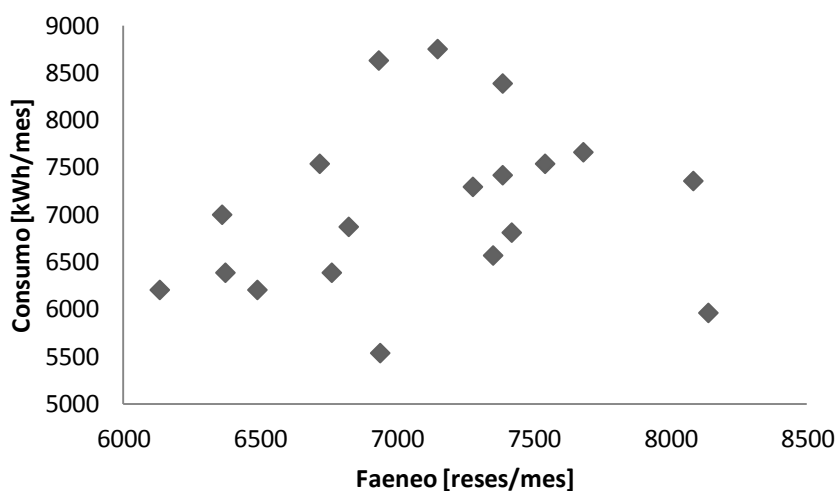


Figura 71: Diagrama de dispersión consumo-faeneo



Mediante inspección visual no se aprecia una aparente correlación de datos. Este hecho se comprueba calculando el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) y el coeficiente de determinación ( $r^2$ ).

$$r = 0,3162$$

$$r^2 = 0,1$$

En vista de estos datos se ve que la correlación es muy débil. El valor del coeficiente de correlación de Pearson es bajo y el coeficiente de determinación nos indica que hay una relación lineal del 10%. Con estos datos se concluye que no hay relación lineal entre los datos de consumo de electricidad y faeneo de reses.

Que no se encuentre una relación lineal puede deberse a que existen unos puntos muy apartados en el diagrama de correlación. Dichos puntos se pueden deber a errores en la medición o a algún cambio en las condiciones del proceso y pueden alterar el resultado del estudio estadístico.

Para el posterior análisis se excluyen los puntos que se consideran más atípicos. Estos son los correspondientes a los meses de Febrero y Mayo de 2012 en los que el consumo de electricidad fue mayor a 8000 kWh y los meses de Octubre y Diciembre de 2012 y Abril de 2013 en los cuales fue menor a 6000 kWh. El diagrama de dispersión tras aplicar este filtro queda de la siguiente forma:

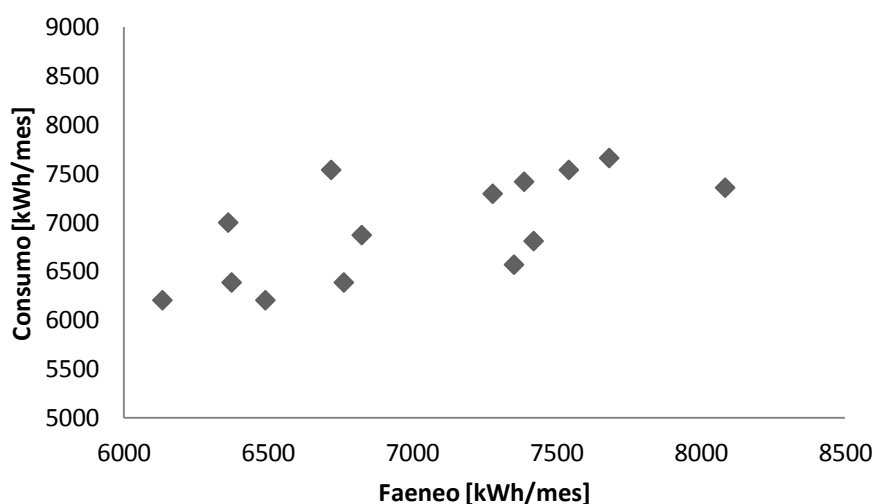


Figura 72: Diagrama de dispersión consumo-faeneo (Filtrado)

Para este nuevo diagrama corregido sí que se aprecia visualmente una correlación positiva. Se comprueba esto mediante el cálculo del coeficiente de Pearson ( $r$ ) y el coeficiente de determinación ( $r^2$ ).

$$r = 0,7305$$

$$r^2 = 0,5336$$

Con esta nueva información se aprecia una fuerte correlación entre el consumo de electricidad y el faeneo de reses. El coeficiente de correlación de Pearson es positivo y cercano a 1. Además el coeficiente de determinación nos indica una relación lineal del 53,36%. Se puede concluir por tanto que existe una relación lineal entre los datos de consumo de electricidad y faeneo de reses y que esta será de carácter positivo.

### III.3 Estimación de la demanda futura

A continuación se estima el incremento que puede sufrir la demanda eléctrica del matadero partiendo de un dato de demanda eléctrica actual del mismo. Se llevan a cabo las siguientes consideraciones previas:

- El dato de demanda eléctrica actual considerado es el del mes de Mayo de 2012<sup>91</sup>.
- El faeneo de una res supone un consumo eléctrico de 1 kWh.
- Se emplearán tres criterios de aumento porcentual de demanda siendo estos optimista (2%), realista (1,6%) y pesimista (1,2%).

El bucle de cálculos incluye las siguientes operaciones:

$$Demanda = Demanda + (Faeneo \cdot \%_{crecimiento})$$

$$Faeneo = Faeneo + (Faeneo \cdot \%_{crecimiento})$$

De esta manera se aplica el porcentaje de aumento de la demanda sobre el faeneo incrementado con el paso de los años. Estos cálculos incluyen el dato de 1 kWh que supone cada res faenada. El bucle de cálculos completo para los tres casos se adjunta a continuación:

<sup>91</sup> Véase apartado 4.2.2 es donde se consideró este dato como el de demanda máxima actual.

**Criterio optimista**

Demanda máxima 2012	8753,0	kWh/mes
Faeneo mensual 2012 (Promedio)	7000,0	reses/mes
<b>Tendencia de aumento en el consumo de carne anual</b>	<b>2,0</b>	<b>%</b>
Aumento del faeneo mensual 2013	140,0	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2013</b>	<b>8893,0</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2013	7140,0	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2014	142,8	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2014</b>	<b>9035,8</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2014	7282,8	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2015	145,7	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2015</b>	<b>9181,5</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2015	7428,5	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2016	148,6	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2016</b>	<b>9330,0</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2016	7577,0	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2017	151,5	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2017</b>	<b>9481,6</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2017	7728,6	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2018	154,6	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2018</b>	<b>9636,1</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2018	7883,1	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2019	157,7	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2019</b>	<b>9793,8</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2019	8040,8	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2020	160,8	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2020</b>	<b>9954,6</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2020	8201,6	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2021	164,0	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2021</b>	<b>10118,6</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2021	8365,6	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2022	167,3	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2022</b>	<b>10286,0</b>	<b>kWh/mes</b>

Tabla 63: Estimación demanda futura (Criterio optimista)

**Criterio realista**

Demanda máxima 2012	8753,0	kWh/mes
Faeneo mensual 2012 (Promedio)	7000,0	reses/mes
<b>Tendencia de aumento en el consumo de carne anual</b>	<b>1,6</b>	<b>%</b>
Aumento del faeneo mensual 2013	112,0	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2013</b>	<b>8865,0</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2013	7112,0	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2014	113,8	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2014</b>	<b>8978,8</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2014	7225,8	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2015	115,6	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2015</b>	<b>9094,4</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2015	7341,4	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2016	117,5	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2016</b>	<b>9211,9</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2016	7458,9	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2017	119,3	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2017</b>	<b>9331,2</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2017	7578,2	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2018	121,3	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2018</b>	<b>9452,5</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2018	7699,5	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2019	123,2	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2019</b>	<b>9575,7</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2019	7822,7	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2020	125,2	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2020</b>	<b>9700,8</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2020	7947,8	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2021	127,2	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2021</b>	<b>9828,0</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2021	8075,0	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2022	129,2	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2022</b>	<b>9957,2</b>	<b>kWh/mes</b>

Tabla 64: Estimación demanda futura (Criterio realista)

**Criterio pesimista**

Demanda máxima 2012	8753,0	kWh/mes
Faeneo mensual 2012 (Promedio)	7000,0	reses/mes
<b>Tendencia de aumento en el consumo de carne anual</b>	<b>1,2</b>	<b>%</b>
Aumento del faeneo mensual 2013	84,0	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2013</b>	<b>8837,0</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2013	7084,0	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2014	85,0	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2014</b>	<b>8922,0</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2014	7169,0	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2015	86,0	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2015</b>	<b>9008,0</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2015	7255,0	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2016	87,1	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2016</b>	<b>9095,1</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2016	7342,1	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2017	88,1	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2017</b>	<b>9183,2</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2017	7430,2	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2018	89,2	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2018</b>	<b>9272,4</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2018	7519,4	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2019	90,2	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2019</b>	<b>9362,6</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2019	7609,6	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2020	91,3	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2020</b>	<b>9453,9</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2020	7700,9	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2021	92,4	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2021</b>	<b>9546,3</b>	<b>kWh/mes</b>
Faeneo mensual 2021	7793,3	reses/mes
Aumento del faeneo mensual 2022	93,5	kWh/mes
<b>Demanda máxima 2022</b>	<b>9639,8</b>	<b>kWh/mes</b>

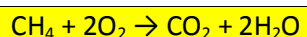
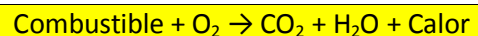
Tabla 65: Estimación demanda futura (Criterio pesimista)



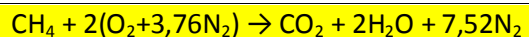
## Anexo IV - Análisis de la demanda de energía térmica

### IV.1 Poder calorífico de distintos combustibles

La combustión es una reacción química de oxidación en la que el combustible (generalmente un hidrocarburo), se combina con oxígeno, desprendiendo energía térmica (poder calorífico).



En la práctica, el oxígeno se toma del aire (21% O<sub>2</sub> y 79% N<sub>2</sub>). En el caso del metano se tiene la siguiente reacción:



El poder calorífico es la cantidad de calor liberada en la combustión completa de una unidad de combustible. Se puede distinguir entre dos tipos de poderes caloríficos dependiendo del estado en el que se encuentre el agua formada en la combustión.

Sustancia	Fórmula	Poder calorífico	
		Superior (kJ/kg)	Inferior (kJ/kg)
Carbono	C (s)	32770	32770
Hidrógeno	H <sub>2</sub> (s)	141780	119950
Metano	CH <sub>4</sub> (g)	55510	50020
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (g)	49910	48220
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (g)	50300	47160
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (g)	51870	47480
Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (g)	48920	45780
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (g)	50350	46360
Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (g)	49500	45720
Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (g)	49010	45350
Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (g)	48260	44790
Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (l)	47900	44430
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (g)	42270	40580
Metanol	CH <sub>3</sub> OH (g)	23850	21110
Metanol	CH <sub>3</sub> OH (l)	22670	19920
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH (g)	30590	27720
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH (l)	29670	26800

Tabla 66: Poderes caloríficos de diferentes sustancias. Fuente: Moran & Shapiro,

El poder calorífico superior (PCS) representa la energía liberada en la combustión completa cuando el agua de los humos condensa y aparece en forma líquida. Por su parte, el poder calorífico inferior (PCI) representa la energía liberada en la combustión completa cuando el agua de los humos aparece en forma gaseosa. La aparición de vapor de agua en los productos de la combustión es algo habitual en las reacciones de combustión que tienen lugar en calderas y motores de combustión interna, y es por ello que se procede a trabajar con los datos del poder calorífico inferior de los combustibles.

## IV.2 Modelización del biogás del matadero

El biogás producido en biodigestores, es una mezcla de varios gases, entre los cuales predomina el metano ( $\text{CH}_4$ )<sup>92</sup>. El metano puro es un gas incoloro e inodoro, que generalmente constituye cerca de un 60 por ciento del total del gas producido en el proceso de digestión anaeróbica. El resto de componentes más importantes son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ , aproximadamente 40%) y concentraciones menores de otros gases como el sulfuro de hidrógeno e hidrógeno molecular. El biogás, se quema con una llama azul y posee un alto poder calorífico que depende fundamentalmente del porcentaje de metano que tenga el biogás.

Los biodigestores ubicados en el matadero tratan un total de 1000 [L/día] de agua residual generando con 4000 [L/día] de biogás mediante el proceso de digestión anaeróbica. La mayor aportación al biogás generado la realiza el primero de los tres biodigestores en serie, mientras que el último es el que menos cantidad genera de los tres. Esto ocurre por el mero hecho de que, al estar dichos biodigestores en serie, la mayor parte de la materia orgánica es digerida en las primeras etapas.

Las pruebas realizadas en los tres biodigestores en serie que hay actualmente en el matadero brindan los siguientes datos de porcentaje de metano<sup>93</sup> en el biogás<sup>94</sup>:

Primer Biodigestor	
Muestra 1	56,3% de $\text{CH}_4$ contenido en el biogás
Muestra 2	57,2% de $\text{CH}_4$ contenido en el biogás

Tabla 67: Resultados pruebas primer biodigestor. Fuente: J.Martí Herrero

Segundo Biodigestor	
Muestra 1	57,3% de $\text{CH}_4$ contenido en el biogás
Muestra 2	54,3% de $\text{CH}_4$ contenido en el biogás

Tabla 68: Resultados pruebas segundo biodigestor. Fuente: J.Martí Herrero

<sup>92</sup> Composición del biogás especificada en la Tabla 1 (Apartado 2.2)

<sup>93</sup> Tanto por ciento en volumen, equivalente a tanto por ciento molar.

<sup>94</sup> Información cedida por J.Martí Herrero.



Tercer Biodigestor	
Muestra 1	49,1% de CH <sub>4</sub> contenido en el biogás
Muestra 2	50,6% de CH <sub>4</sub> contenido en el biogás

Tabla 69: Resultados pruebas tercer biodigestor. Fuente: J.Martí Herrero

El conjunto de los tres biodigestores brinda un biogás con un porcentaje de metano entre el 54 y el 56%. Esta información desvela que el biogás obtenido es apto para alimentar un motor de combustión interna ya que estos motores exigen un porcentaje mínimo de metano en el biogás del 50%. Se toma como dato:

**Porcentaje de metano (CH<sub>4</sub>) en el biogás = 55%**

El biogás del matadero se considerará con un 55% de contenido de metano en volumen, mientras que el resto de su composición será mayoritariamente CO<sub>2</sub>. La importancia de conocer el porcentaje de metano en el biogás estriba en que dicho componente es el que actúa como combustible en la reacción de combustión. El metano es por tanto el componente del biogás que otorga la energía que permite generar electricidad.

El poder calorífico<sup>95</sup> del biogás del matadero vendrá impuesto por su contenido en metano y por el poder calorífico de dicho compuesto. Se considera la siguiente información del poder calorífico del metano en distintas unidades:

Sustancia	Fórmula	PCI [kJ/kg] <sup>96</sup>	PCI [kWh/m <sup>3</sup> ] <sup>97</sup>
Metano	CH <sub>4</sub> (g)	50020	9,47

Tabla 70: Poder calorífico inferior del metano

Con la información obtenida se calcula el poder calorífico que tendrá el biogás del matadero<sup>98</sup>, el cual es el combustible que se empleará en el proyecto de generación eléctrica:

$$PCI_{biogás} = 0,55 \cdot PCI_{CH_4} = 0,55 \cdot 9,47 = 5,2085 \frac{kWh}{m^3}$$

**PCI biogás del matadero ≈ 5,21 [kWh/m<sup>3</sup>]**

<sup>95</sup> Concepto definido en el apartado I de este mismo Anexo.

<sup>96</sup> Fuente: Moran & Shapiro, 2004

<sup>97</sup> Fuente: Walsh, 1988

<sup>98</sup> Resultado obtenido en unidades de [kWh/m<sup>3</sup>] por ser consideradas las unidades más adecuadas para realizar cálculos con combustibles gaseosos.

### IV.3 Cálculo de la demanda de biogás de la caldera del matadero

En el matadero municipal se dispone de una caldera la cual se pretende adaptar para su funcionamiento con biogás. Se dispone de los siguientes datos de dicha caldera mostrados por su placa de características<sup>99</sup>:

Equator - Geradora de Agua Quente	
Nº de fabricación	569
Fecha de fabricación	16/05/1991
Capacidad (agua)	1500 L
Salida (agua)	600 L/h
Potencia	60000 kcal/h
Presión máx. de trabajo	6 kg/cm <sup>2</sup>
Combustible	GLP

Tabla 71: Placa de especificaciones de la caldera del matadero municipal de Cochabamba

Se emplea esta información para calcular el biogás que se deberá destinar a la caldera para cubrir la demanda de energía térmica que desea cubrir el matadero. Dicha demanda se considerará que es de 12 horas diarias durante las cuales la caldera funcionará a la misma potencia que la indicada por su placa de características.

El dato de la potencia de la caldera refleja el producto entre el flujo másico del combustible y el poder calorífico del mismo. En el caso de esta caldera dicho combustible es gas licuado de petróleo, concretamente propano.

$$\dot{Q} = \dot{m}_{C_3H_8} \cdot PCI_{C_3H_8} = 60000 \frac{kcal}{h} = 251148 \frac{kJ}{h}$$

Se puede calcular cual es el flujo másico de propano que gasta la caldera del matadero empleando el dato del poder calorífico inferior del propano<sup>100</sup>.

$$\dot{m}_{C_3H_8} = \frac{\dot{Q}}{PCI_{C_3H_8}} = \frac{251148 \frac{kJ}{h}}{46360 \frac{kJ}{kg}} = 5,417 \frac{kg}{h}$$

A continuación se realizan los cálculos para el caso del metano (CH<sub>4</sub>) por ser el componente mayoritario del biogás (55%). Con los datos que se obtengan se podrá calcular el caudal de biogás necesario para la caldera. Para mantener la misma potencia de trabajo se deberá cumplir:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{CH_4} \cdot PCI_{CH_4} = 251148 \frac{kJ}{h}$$

<sup>99</sup> También adjunta en el apartado 4.4.1

<sup>100</sup> Información del poder calorífico del propano disponible en el apartado 1 de este mismo Anexo.

El dato del poder calorífico del metano que aparece en el apartado anterior de este mismo anexo nos permite conocer el flujo másico de metano necesario para hacer funcionar la caldera a la potencia deseada. Se puede calcular cual es el flujo másico de metano que se requeriría para hacer funcionar la caldera a dicha potencia<sup>101</sup>:

$$\dot{m}_{CH_4} = \frac{\dot{Q}}{PCI_{CH_4}} = \frac{251148 \frac{kJ}{h}}{50020 \frac{kJ}{kg}} = 5,021 \frac{kg}{h}$$

Se empleará el dato de la densidad del metano para obtener el flujo volumétrico de metano necesario para hacer funcionar la caldera.

$$\rho_{CH_4} = 0,66 \frac{kg}{m^3}$$

Este valor de densidad del metano es para condiciones estándar (25°C, 1atm). Al encontrarse Cochabamba a 2570 m.s.n.m. se hace necesario corregir este valor al de la presión del emplazamiento. Para ello se considera el metano como gas ideal y se considera mínima la variación debida a la temperatura debido al clima de la ubicación<sup>102</sup>:

$$\rho_{CH_4(z=2570)} = \frac{P_{(z=2570)}}{P_{atm}} \cdot \rho_{CH_4} = \frac{74028 Pa}{101325 Pa} \cdot 0,66 \frac{kg}{m^3} = 0,4822 \frac{kg}{m^3}$$

La obtención de la presión a la altura de 2570 m.s.n.m. se adjunta en el Anexo V.4. Empleando el valor calculado para la densidad del metano a la presión de Cochabamba se calcula el flujo volumétrico de metano necesario para hacer funcionar la caldera a la potencia de su placa:

$$\dot{V}_{CH_4} = \dot{m}_{CH_4} \cdot \rho_{CH_4(z=2570)} = \frac{5,021 \frac{kg}{h}}{0,4822 \frac{kg}{m^3}} = 10,41 \frac{m^3}{h}$$

Tras estos cálculos se conoce el metano necesario para hacer funcionar la caldera. Dicho metano se encuentra en la composición del biogás del matadero en un porcentaje del 55%. Para sustituir la energía del metano empleando biogás será necesaria una mayor cantidad del mismo:

$$\dot{V}_{biogás} = \frac{\dot{V}_{CH_4}}{0,55} = \frac{10,41 \frac{m^3}{h}}{0,55} = 18,93 \frac{m^3}{h}$$

<sup>101</sup> Información del poder calorífico del metano disponible en el apartado 1 de este mismo Anexo

<sup>102</sup> Descripción del clima de Cochabamba adjunta en el apartado 3.2.2

Por tanto, para hacer funcionar la caldera a la potencia de la placa se requiere un flujo volumétrico de 18,93 [m<sup>3</sup>/h] de biogás. Teniendo en cuenta que la caldera se requiere durante 12 horas diarias se puede calcular el volumen diario de biogás que consumirá la caldera.

$$\dot{V}_{\text{biogás}} = 18,93 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 12 \frac{\text{h}}{\text{día}} = 227,16 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Esta cantidad de biogás nos permitirá obtener la energía térmica que necesita la caldera para funcionar diariamente. Sin embargo, si esto se lleva a la práctica, el consumo de biogás que tendrá lugar será mayor al calculado. Esto se debe a que el gran porcentaje de componentes inertes presentes en la composición del biogás reducirá la temperatura que alcanzarán los humos de la caldera. Es por ello que se considera que el consumo de biogás será un 20% mayor.

$$\dot{V}_{\text{biogás}} = 227,16 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot 1,2 = 272,59 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \approx 272,6 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Se presenta la siguiente tabla a modo de resumen de los datos calculados:

Potencia de la caldera	251148	kJ/kg
Flujo volumétrico de biogás necesario	18,93	m <sup>3</sup> /h
Volumen de biogás teórico consumido diariamente por la caldera	227,16	m <sup>3</sup> /día
Sobredimensionamiento	20	%
<b>Volumen de biogás real consumido diariamente por la caldera</b>	<b>272,6</b>	<b>m<sup>3</sup>/día</b>

Tabla 72: Resumen de los datos obtenidos para la caldera

#### IV.4 Cálculo de la demanda de biogás de la incineradora del matadero

A continuación se realizan los cálculos para determinar el biogás que requerirá la incineradora del matadero municipal. Actualmente, el combustible empleado por la incineradora es leña y pretende ser sustituido por biogás.

El poder calorífico inferior de un combustible como la leña depende de distintos factores (humedad, tipo de madera,...). Debido a que la leña empleada en el matadero municipal no es de primera calidad, se asume que su valor se encuentra entre las 3000 y las 4000 [kcal/kg].

La incineradora funciona unos 2 o 3 días a la semana según se requiera de sus servicios. El día que entra en funcionamiento, funciona ininterrumpidamente durante 5 horas durante las cuales se gastan aproximadamente unos 10 kg de leña.

Se emplea a continuación el dato de 10 kg diarios de leña para calcular cuanto energía térmica supone este consumo y cuanto biogás se necesitaría para cubrirlo. Se estudian dos casos diferentes de poder calorífico inferior de la leña:

<b>Caso 1: PCI (Leña) = 3000 [Kcal/kg]</b>		
PCI (Leña)	3000	kcal/kg
	3,49	kWh/kg
Gasto de leña	10	kg/día
Energía térmica (Incineradora)	34,87	kWh/día
PCI (biogás del matadero)	5,21	kWh/m <sup>3</sup>
<b>Biogás necesario</b>	<b>6,69</b>	<b>m<sup>3</sup>/día</b>

Tabla 73: Determinación del consumo de la incineradora (PCI = 3000 kcal/kg)

<b>Caso 2: PCI (Leña) = 4000 [Kcal/kg]</b>		
PCI (Leña)	4000	kcal/kg
	4,65	kWh/kg
Gasto de leña	10	kg/día
Energía térmica (Incineradora)	46,5	kWh/día
PCI (biogás del matadero)	5,21	kWh/m <sup>3</sup>
<b>Biogás necesario</b>	<b>8,92</b>	<b>m<sup>3</sup>/día</b>

Tabla 74: Determinación del consumo de la incineradora (PCI = 4000 kcal/kg)

Bajo la primera consideración se obtiene que en la incineradora se requieren 34 [kWh/día] de energía térmica los cuales pueden cubrirse con 6,69 [m<sup>3</sup>/día] de biogás. Con la segunda consideración se obtiene que la incineradora requiere de 46,5 [kWh/día] los cuales pueden cubrirse con 8,92 [m<sup>3</sup>/día] de biogás.

La conclusión es que los 10 kg de leña que se emplean actualmente en la incineradora pueden ser cubiertos por una cantidad de biogás de entre 6,69 y 8,92 m<sup>3</sup>. Se toma el límite superior de este intervalo y se redondea al alza para evitar quedar cortos en la estimación.

<b>Volumen de biogás consumido diariamente por la incineradora</b>	<b>9 m<sup>3</sup>/día</b>
--------------------------------------------------------------------	----------------------------



## Anexo V - Dimensionamiento del sistema generador

### V.1 Seguimiento del contador eléctrico del matadero

El matadero municipal de Cochabamba dispone de un contador trifásico modelo TARIGYR 400. Se llevó a cabo un seguimiento del mismo con el objetivo de obtener cualquier información de consumos eléctricos que pudiera ser de utilidad.

#### Medida de energía eléctrica consumida en una hora de faeneo

Gracias a las indicaciones de la compañía distribuidora de energía ELFEC se pudo saber que el aumento de una unidad en el contador de energía activa suponía un consumo por parte del matadero de 60 kWh. Se llevó a cabo un seguimiento al contador del matadero durante las horas de faeneo para conocer el consumo de energía eléctrica que tiene lugar en el mismo. Los resultados de este seguimiento fueron los siguientes:

Hora	10:30	10:45	11:00	11:15	12:00	12:15	12:30	12:45	13:00	13:15	13:30
P. Activa	23000	23000	23000	23001	23001	23001	23001	23001	23001	23001	23002

Tabla 75: Medidas de potencia activa

Se aprecia que al contador le cuesta 2 horas y 15 minutos aumentar en una unidad la potencia activa. Esto quiere decir que en 2,25 horas de faeneo se consumen 60 kWh de energía eléctrica, lo cual supone un consumo de 26,7 kWh por cada hora de faeneo. Esta medida permite sacar las siguientes conclusiones:

Consumos de energía eléctrica		
Demanda mensual (Enero 2013)	7662	kWh/mes
Días de operación	26	días/mes
Demanda diaria	294,69	kWh/día
Demanda hora de faeneo	26,7	kWh/h
Tiempo faeneo	8	h/día
Demanda total (faeneo)	213,60	kWh/día
Demanda diaria (no faeneo)	81,09	kWh/día

Tabla 76: Consumos diarios en base a las medidas al contador

En base a los datos obtenidos por el contador y para la demanda de Enero de 2013, mes en el que fueron tomadas dichas medidas, se aprecia que las 8 horas en las que transcurre el faeneo se consumen 213,6 kWh que suponen un 72,5% del consumo diario de energía eléctrica.

### Medida de potencia máxima consumida

Las facturas eléctricas permiten saber que el matadero municipal contrata una potencia de 30 kW que en ocasiones excede y le supone una facturación de 35 o 40 kW dependiendo de cuanto se exceda. Las facturas permiten apreciar cuál puede ser el pico de potencia consumido por el matadero, pero será el contador el que nos otorgue un dato preciso.

El dato de potencia máxima figuraba en el contador de la siguiente manera:

n09	P0,64
-----	-------

En base a las indicaciones de la compañía distribuidora de energía ELFEC se interpretó que la potencia máxima registrada para el periodo 09 (correspondiente al último año) fue de 38,4 kW.

$$P_{m\acute{a}x} = 0,64 \cdot 60 = 38,4 \text{ kW}$$

## V.2 Levantamiento de cargas del matadero

Se realiza un levantamiento de los equipos instalados en el matadero municipal de Cochabamba. El objetivo del mismo será definir los picos de demanda de forma que dicha información pueda ser usada para dimensionar correctamente el equipo de combustión. Se tratará de obtener la información para un día de trabajo intenso en el matadero en el cual la demanda eléctrica sea mayor. Es por ello que el levantamiento de cargas considerará que muchas maquinas que habitualmente no trabajan simultáneamente sí que lo hacen.

Para la realización del levantamiento de cargas se tiene en cuenta la información sobre la maquinaria disponible en el matadero<sup>103</sup> y las indicaciones sobre su tiempo de operación y franja horaria indicadas por los operarios de las instalaciones.

Las cargas se dividen en tres grupos. El primer grupo es la planta interior y se ubica en el interior del edificio principal del matadero. Es en donde se encuentran las cargas debidas al proceso productivo. Las cargas que tienen lugar en la planta interior son las siguientes:

<sup>103</sup> Maquinaria disponible en el matadero expuesta en el apartado 3.4.1



Planta interior				
Equipos	Cantidad	Potencia [kW]	Horas diarias	Energía diaria [kWh]
Motor transporte de ganado	1	3,73	8	29,83
Motor colgado de ganado A	2	3,73	8	59,66
Motor colgado de ganado B	1	2,98	8	23,86
Sierra espalda	1	2,24	8	17,90
Sierra pecho	1	1,49	8	11,93
Compresor	1	4,10	10	41,01
Ventilador proceso	1	0,75	10	7,46
Ventiladores extra	2	0,75	2	2,98
<b>TOTAL</b>		<b>24,24</b>		<b>194,63</b>

Tabla 77: Cargas eléctricas planta interior

El segundo grupo está ubicado en el exterior del edificio y se le denominará planta exterior. Las cargas de la planta exterior son debidas a los procesos de limpieza y tratamiento de residuos. Las cargas que tienen lugar en la planta exterior son las siguientes:

Planta exterior				
Equipos	Cantidad	Potencia [kW]	Horas diarias	Energía diaria [kWh]
Motor de lodos	1	4,10	12	49,22
Bomba	1	5,59	7	39,15
Decantador	1	5,59	8	44,74
Saranda	1	5,59	8	44,74
<b>TOTAL</b>		<b>20,88</b>		<b>177,85</b>

Tabla 78: Cargas eléctricas planta exterior

El tercer grupo de cargas abarca el resto de servicios que acontecen en el matadero. Estos son los consumos debidos a la iluminación y el uso de equipos eléctricos y electrónicos de taller, comedor, oficinas y estancia del portero.

Otros servicios			
Servicios	Potencia [kW]	Horas de servicio	Energía diaria [kWh]
Taller	0,8	8	6,4
Comedor	1,2	2	2,4
Oficinas	0,4	15	6
Portero	0,2	24	4,8
<b>TOTAL</b>	<b>2,6</b>		<b>19,6</b>

Tabla 79: Cargas eléctricas otros servicios

Se emplean estos datos para determinar el consumo de las cargas durante un día de trabajo en el matadero. La información que tiene en cuenta la simultaneidad de los distintos procesos queda tabulada de la siguiente manera:

Horas de consumo	Cargas planta interior [kW]	Cargas planta exterior [kW]	Cargas otros servicios [kW]	Potencia Total [kW]
0:00	0	0	0,2	0,2
1:00	0	0	0,2	0,2
2:00	0	0	0,2	0,2
3:00	0	0	0,2	0,2
4:00	0	0	0,2	0,2
5:00	0	0	0,2	0,2
6:00	0	0	0,2	0,2
7:00	22,7	4,1	0,6	27,4
8:00	22,7	9,7	0,6	33
9:00	22,7	9,7	1,4	33,8
10:00	22,7	9,7	1,4	33,8
11:00	22,7	11,2	1,4	35,3
12:00	22,7	11,2	2,6	36,5
13:00	22,7	11,2	2,6	36,5
14:00	22,7	11,2	1,4	35,3
15:00	0	20,9	1,4	28,6
16:00	0	20,9	1,4	28,6
17:00	0	20,9	0,6	21,5
18:00	0	20,9	0,6	21,5
19:00	0	0	0,6	0,6
20:00	0	0	0,6	0,6
21:00	0	0	0,6	0,6
22:00	0	0	0,2	0,2
23:00	0	0	0,2	0,2

Tabla 80: Levantamiento de cargas

Esta información desvela cual es el consumo que tiene lugar en el matadero en un día de trabajo intenso, y por tanto, de mayor consumo de energía eléctrica. Permite obtener la potencia máxima que requieren las instalaciones y el consumo de energía diario. La siguiente gráfica permite visualizar mejor esta información:

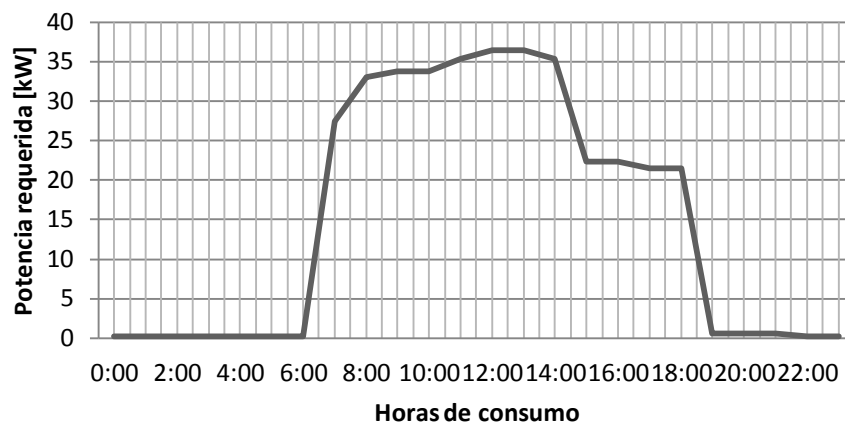


Figura 73: Modelo de demanda eléctrica actual

Mediante el levantamiento de cargas se concluye que el matadero municipal de Cochabamba puede llegar a consumir 362,8 [kWh/día] con un pico de potencia de 36,5 kW que tendría lugar durante el faeneo. Las 8 horas en las que se desarrolla el faeneo (7:00-15:00) suponen el 72,5% del consumo diario de energía eléctrica (271,6 kWh). El faeneo y las cuatro horas posteriores al mismo (7:00-19:00) suponen el 99% del consumo diario de energía eléctrica (359,2 kWh).

Levantamiento de cargas	
Potencia máxima	36,5 kW
Consumo diario (24h)	362,8 kWh
Consumo faeneo (8h)	271,6 kWh
Consumo faeneo + 4h (12h)	359,2 kWh

Figura 74: Conclusiones del levantamiento de cargas

### V.3 - Modelo de demanda eléctrica futura

Se parte de la estimación de la demanda eléctrica futura realizada en el apartado 4.3.3. En dicho apartado fue calculado un consumo de 10200 [kWh/mes] para el año 2022, año que se consideró como horizonte temporal del proyecto. Esta información permitirá elaborar un modelo de demanda futura que ofrezca información sobre como cambiarán las operaciones del matadero debido al incremento de la demanda de carne

La demanda diaria futura teniendo en cuenta que el matadero continuará operando un promedio de 26 días al mes es:

$$\text{Demanda futura} = 392,3 \text{ kWh/día}$$

La demanda diaria proporcionada por el levantamiento de cargas<sup>104</sup> se estimó en 362,8 [kWh/día], por lo tanto se aprecia un incremento en la demanda de electricidad de 29,5 [kWh/día]. Este incremento en el consumo no puede deberse a un incremento de las cargas eléctricas. Las medidas realizadas al contador eléctrico<sup>105</sup> mostraron una potencia máxima de 38,4 kW, la cual tenía lugar durante el faeneo. Por tanto, esta potencia nunca será rebasada aun si los gestores se ven obligados a sustituir alguna maquina<sup>106</sup>.

Es por ello que se considera que este incremento del consumo se debe únicamente a un incremento en la duración del faeneo. Una consecuencia de esto será que el consumo por hora de faeneo se mantendrá. Tomando el dato ofrecido por el contador de que una

<sup>104</sup> Véase Anexo V.2

<sup>105</sup> Véase Anexo V.1

<sup>106</sup> La maquinaria actual se encuentra obsoleta y una sustitución de la misma implicaría una reducción del consumo.

hora de faeneo supone un consumo de 26,7 [kWh/h] se puede calcular el tiempo que se incrementará el mismo.

$$\Delta t_{faeneo} = \frac{29,5 \frac{kWh}{día}}{26,7 \frac{kWh}{h}} = 1,1 \frac{h}{día}$$

En base a este cálculo se considera que en el año 2022 el faeneo se habrá incrementado una hora para poder abastecer la demanda de carne. El faeneo pasará a durar un promedio de 9 horas en lugar de las 8 que dura actualmente, suponiendo esto que la planta interior se encontrará operativa durante la franja horaria de 15:00 a 16:00.

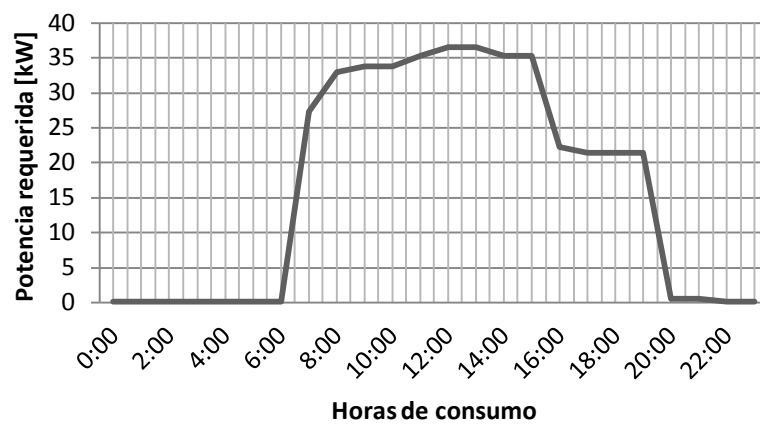


Figura 75: Modelo de demanda eléctrica futura

La elaboración del modelo de demanda futura nos permite apreciar un cambio en los porcentajes de consumo diario. Al incrementarse el faeneo también aumenta su porcentaje sobre la demanda diaria. En este caso, las 9 horas en las que se desarrolla el faeneo (7:00-16:00) suponen el 77,4% del consumo diario de energía eléctrica. Por su parte, el faeneo y las cuatro horas posteriores al mismo (7:00-19:00) suponen el 93,8% del consumo diario de energía eléctrica. Esto supone un descenso con respecto al modelo de demanda actual en el que esta franja representaba el 99% del consumo diario. La justificación de esta reducción es que las labores de limpieza y tratamiento de residuos se posponen una hora haciendo que la franja horaria de 19:00 a 20:00 suponga un consumo importante.

Modelo de demanda eléctrica futura	
Potencia máxima	36,5 kW
Consumo diario (24h)	396,7 kWh
Consumo faeneo (9h)	306,9 kWh
Consumo faeneo + 3h (12h)	372,2kWh

Tabla 81: Conclusiones del modelo de demanda eléctrica futura

## V.4 – Variación de la presión atmosférica con la altitud

Las propiedades más importantes del aire atmosférico son la densidad, viscosidad, conductividad térmica, calor específico, difusividad y humedad relativa. De estas propiedades, solo la densidad y la humedad relativa se ven afectadas por un cambio en la altitud ya que, por debajo de 3000 m.s.n.m., el efecto de la altitud en propiedades como el calor específico, conductividad térmica y viscosidad se puede considerar despreciable.

La variación de estas propiedades se debe al cambio en la presión atmosférica. Cuando la altitud aumenta la presión atmosférica decrece de acuerdo con la siguiente expresión<sup>107</sup>:

$$P(z) = P_0 [1 - 2,25577 \cdot 10^{-5} \cdot z]^{5,2559}$$

Donde  $P(z)$  es la presión atmosférica en kPa,  $P_0$  es la presión a nivel del mar (101.325 kPa) y  $z$  es la altura sobre el nivel del mar en metros. Esta ecuación no tiene en cuenta las variaciones que pueden ocurrir debidas a la temperatura. Representando gráficamente esta expresión se puede apreciar el decremento exponencial de la presión conforme aumenta la altura.

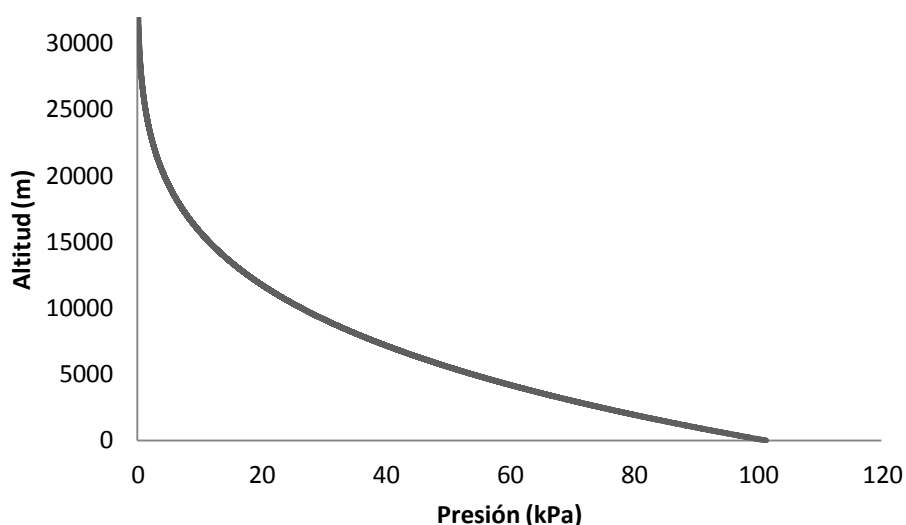


Figura 76: Variación de la presión atmosférica con la altitud

Dado que esta expresión es aplicable a cualquier punto de la superficie terrestre puede ser calculada la presión atmosférica a la altitud de Cochabamba (2570 m.s.n.m.).

$$P_{(z = 2570 \text{ m})} = 73,81 \text{ kPa}$$

<sup>107</sup> Fuente: "Design considerations for combined cooling, heating, and power systems at altitude" de Nelson Fumo, Pedro J. Mago y Kenneth Jacobs.

## V.5 - Calculo del ratio de variación de densidad $\xi(z)$

En este apartado se calculará la pérdida de potencia que sufrirá el equipo de combustión por trabajar en altitud empleando como criterio la variación de la densidad del aire<sup>108</sup>.

Se asume que:

- El aire es un fluido compresible. Esto hará que un decrecimiento de la presión provoque una expansión de la masa de aire, aumentando su volumen y disminuyendo su densidad.
- El aire atmosférico puede considerarse una mezcla de aire seco y vapor de agua. El contenido en agua del aire viene reflejado por su ratio de humedad, el cual también varía con la altitud.

Podemos decir por tanto que la densidad del aire varía con la altura debido a que depende de factores como la presión y del ratio de humedad, los cuales varían con la misma. Las ecuaciones que representan la función densidad y la función densidad en altura son las siguientes:

$$\rho = \frac{P}{R_{da}T(1 + 1,608w)}(1 + w)$$

$$\rho(z) = \frac{P(z)}{R_{da}T[1 + 1,608w(z)]}[1 + w(z)]$$

Siendo  $w$  el ratio de humedad,  $w(z)$  el ratio de humedad en altura y  $R_{da}$  la constante del aire seco. Tanto  $w$  como  $R_{da}$  son datos constantes que dependen de la climatología de cada zona. Por su parte  $w(z)$  depende de factores propios de la altitud como la temperatura y la presión.

Se define el ratio de la densidad del aire para una altura  $z$  como:

$$\xi(z) = \frac{\rho(z)}{\rho} = [1 - 2,25577 \cdot 10^{-5}(z)]^{5,2559} \frac{[1 + w(z)]}{(1 + w)} \frac{[1 + 1,608w(z)]}{(1 + 1,608w)}$$

Asumiendo que la variación del ratio de humedad con la altitud es despreciable ( $w(z) = w$ ). La expresión anterior se simplifica:

$$\xi(z) = \frac{P(z)}{P} = [1 - (2,25577)(10^{-5})(z)]^{5,2559}$$

<sup>108</sup> Fuente: "Design considerations for combined cooling, heating, and power systems at altitude" de Nelson Fumo, Pedro J. Mago y Kenneth Jacobs.

Aunque el ratio de densidad del aire con la altura no tiene un comportamiento lineal, se puede apreciar una caída aproximada en su valor de un 1% por cada 100 metros de incremento de altitud.

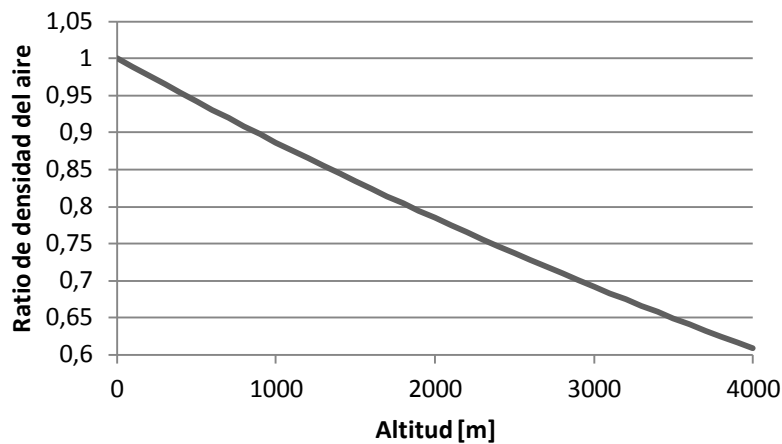


Figura 77: Variación del ratio de densidad con la altitud

Para equipos de combustión una aproximación razonable es estimar la pérdida de potencia del equipo basándonos en cambio de la densidad del aire con la altitud. Se considera que la energía a la salida de un equipo de combustión trabajando en altitud puede ser estimada como:

$$Output(z) = \xi(z) \cdot Output_{nominal}$$

Donde  $Output(z)$  es la potencia que se desea obtener en altitud  $z$ . Mediante un dimensionamiento se obtuvo que el matadero municipal de Cochabamba se requieren 38,5 kilovatios de potencia.

$$Output(z) = 38,5 \text{ kW}$$

Se calcula el ratio de variación de densidad para a la altitud de Cochabamba (2570 m.s.n.m.).

$$\xi(z = 2570) = 0,73$$

Empleando la ecuación anterior se calcula la potencia nominal que requerirá el equipo de combustión para prevenir las pérdidas debidas a la altitud.

$$Output_{nominal} = \frac{Output(z)}{\xi(z)} = \frac{38,5}{0,73} = 52,74 \text{ kW}$$

Esto corresponde a unas pérdidas de potencia por altura del 27%.

V.6 – Catálogo grupos electrógenos AQL

GENERADORES AQL-GENSET								
Configuration and Quotation on Biogas Generator Sets (220/127V, 60Hz, 3P4W)								
		Standby(kVA)	9	14	21	27,5	34	41
Item		Model	AQL9	AQL14	AQL21	AQL27	AQL34	AQL41
Spec.	standby power	kVA/kWe	8.8/7	14/11.0	21/16.5	27.5/22	34/28	41/33
	prime power	kVA/kWe	8/6.4	12.5/10	19/15	25/20	31/25	38/30
	continous power	kVA/kWe	6.4/5.0	10/8.0	15/12	20/16	25/20	30/24
	frequency	Hz	60	60	60	60	60	60
	rated voltage	V	220	220	220	220	220	220
	rated current	A	10,8	18,0	27,1	36,1	45,1	54,1
	power factor	COSφ	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
	model	—	R-F10A/4Y	R-4Y	R-4Y	R-4Y	R-4BT	R-4BTA
	displacement	L	1.051/2.237	2,237	2,237	2,237	3,9	3,9
	speed	RPM	3600/1800	1800	3600	3600	1800	1800
	compression ratio	—	9.2:1/8.8:1	8.8:1	8.8:1	8.8:1	10:1	10:1
	bore*stroke	mm*mm	66*78/91*86	91*86	91*86	91*86	102*120	102*120
	starting method	—	electric start	electric start	electric start	electric start	electric start	electric start
	cooling method	—	water cooled	water cooled	water cooled	water cooled	water cooled	water cooled
	oil capacity	L	3/4.2	4,2	4,2	4,2	9,5	9,5
	oil cooler	—	with/without	without	with	with	with	with
	mixer	—	Venturi	Venturi	Venturi	Venturi	IMPSCO, USA	IMPSCO, USA
	ignition system	—	distributor	distributor	distributor	distributor	made in Canada	made in Canada
	speed governor	—	DEG-25/DEG-36	DEG-36	DEG-36	DEG-36	WOODWARD	WOODWARD
	biogas filter	—	—	—	—	—	KromSchroeder, Germany	
biogas pres. reducer (optional)	—	Fiorentini, Italy	Fiorentini, Italy	Fiorentini, Italy	Fiorentini, Italy	Fiorentini, Italy	Fiorentini, Italy	
Alternator	brand	—	Leroy Somer	Leroy Somer	Leroy Somer	Leroy Somer	Leroy Somer	Leroy Somer
	phase	—	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires
	connecting method	—	flange-coupling	SAE standard	SAE standard	SAE standard	SAE standard	SAE standard
	way of excitation	—	brushless, self-excitation	brushless, self-excitation	brushless, self-excitation	brushless, self-excitation	brushless, self-excitation	brushless, self-excitation
	insulation grade	—	H level	H level	H level	H level	H level	H level
	controller type	—	SmartGen Digital Controller	SmartGen Digital Controller	SmartGen Digital Controller	SmartGen Digital Controller	SmartGen Digital Controller	SmartGen Digital Controller
	display	—	LCD	LCD	LCD	LCD	LCD	LCD
	fuel	—	biogas	biogas	biogas	biogas	biogas	biogas
	gas inlet pressure	kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa
	dimension (open type)	mm*mm*mm	1200*760*850 /1400*710*920	1400*710*920	1400*710*920	1400*710*920	1950*1000*1450	1950*1000*1450
	net weight (open type)	kg	480	480	480	480	850	850
	dimension (silent type)	mm*mm*mm	2050*970*1100	2050*970*1100	2050*970*1100	2050*970*1100	2500*1200*1600	2500*1200*1600
	net weight (silent type)	kg	285/760	1216	760	760	1400	1400
	sound level(open type)	dB(A)@7m	—	64	77	77	77	77
	sound level(silent type)	dB(A)@7m	105,6	58	65	65	62	62
	protection level	—	IP23	IP23	IP23	IP23	IP23	IP23
	warranty period	hrs.	4000	4000	4000	4000	4000	4000
	biogas consumption	m3/kW.h	1,04	0,65	0,64	0,60	0,58	0,55
	electrical efficiency ±2%	%	30,00	30,00	31,00	31,00	33,00	33,00
	thermal efficiency ±2%	%	52,00	52,00	53,00	53,00	52,00	53,00
	total efficiency ±2%	%	82,00	82,00	83,00	83,00	85,00	85,00
	FOB - GERMANY	US\$	\$6.640,00	\$7.920,00	\$8.400,00	\$9.600,00	\$19.168,00	\$19.520,00
with ATS(Optional)	add	\$480,00	\$576,00	\$576,00	\$576,00	\$936,00	\$936,00	
with heat recovery system(Optional)	add	\$5.200,00	\$5.385,60	\$5.600,00	\$5.760,00	\$7.360,00	\$7.520,00	
with soundproof enclosure(Optional)	add	\$1.758,40	\$1.758,40	\$1.758,40	\$1.758,40	\$2.398,40	\$2.398,40	
With grid synchronization(Optional)	add	\$7.200,00	\$7.200,00	\$7.200,00	\$7.200,00	\$7.200,00	\$7.200,00	



GENERADORES AQL-GENSET							
Configuration and Quotation on Biogas Generator Sets (Alternator, 220/127V, 60Hz, 3P4W) (Cummins Engine & Leroy Somer)							
	Standby(kVA)	55	69	83	96	110	
Item	Model	AQL55	AQL69	AQL83	AQL96	AQL110	
Spec.	standby power	kVA/kWe	55/44	69/55	83/66	96/77	110/88
	prime power	kVA/kWe	50/40	63/50	75/60	88/70	100/80
	continuous power	kVA/kWe	40/32	50/40	60/48	70/56	80/64
	frequency	Hz	60	60	60	60	60
	rated voltage	V	220	220	220	220	220
	rated current	A	72,2	90,2	108,3	126,3	144,3
	power factor	COSφ	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Engine	brand	—	Cummins brand-new gas engine				
	model	—	R-4BTAA	R-6BTA	R-6BTAA	R-6CTA	R-6CTAA
	displacement	L	3,9	5,9	5,9	8,3	8,3
	speed	RPM	1800	1800	1800	1800	1800
	compression ratio	—	10:1	10:1	10:1	10:1	10:1
	bore*stroke	mm*mm	102*120	102*120	102*120	114*135	114*135
	cooling method	—	water cooled	water cooled	water cooled	water cooled	water cooled
	oil capacity	L	9,5	14,2	14,2	18,9	18,9
	oil cooler	—	with	with	with	with	with
	mixer	—	IMPCO, USA	IMPCO, USA	IMPCO, USA	IMPCO, USA	IMPCO, USA
	ignition system	—	made in Canada	made in Canada	made in Canada	made in Canada	made in Canada
	speed governor	—	WOODWARD	WOODWARD	WOODWARD	WOODWARD	WOODWARD
	biogas filter	—	KromSchroeder, Germany				
	biogas pres. reducer (optional)	—	Fiorentini, Italy	Fiorentini, Italy	Fiorentini, Italy	Fiorentini, Italy	Fiorentini, Italy
Alternator	brand	—	Leroy Somer	Leroy Somer	Leroy Somer	Leroy Somer	Leroy Somer
	phase	—	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires
	connecting method	—	SAE standard	SAE standard	SAE standard	SAE standard	SAE standard
	way of excitation	—	brushless, self-excitation	brushless, self-excitation	brushless, self-excitation	brushless, self-excitation	brushless, self-excitation
	insulation grade	—	H level	H level	H level	H level	H level
	controller type	—	SmartGen Digital Controller	SmartGen Digital Controller	SmartGen Digital Controller	SmartGen Digital Controller	SmartGen Digital Controller
	display	—	LCD	LCD	LCD	LCD	LCD
	fuel	—	biogas	biogas	biogas	biogas	biogas
	gas inlet pressure	kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa
	dimension (open type)	mm*mm*mm	1950*1000*1450	2280*1050*1500	2280*1050*1500	2250*1050*1560	2250*1050*1560
	net weight (open type)	kg	1000	1000	1000	1350	1350
	soundproof enclosure	—	optional	optional	optional	optional	optional
	protection level	—	IP23	IP23	IP23	IP23	IP23
	warranty period	hrs.	4000	4000	4000	4000	4000
	biogas consumption	m <sup>3</sup> /kW.h	0,55	0,58	0,55	0,58	0,55
	electrical efficiency ±2%	%	33,00	33,00	34,00	33,00	34,00
thermal efficiency ±2%	%	52,00	52,00	53,00	52,00	53,00	
total efficiency ±2%	%	85,00	85,00	86,00	85,00	86,00	
FOB GERMANY	US\$	\$21.120,00	\$24.640,00	\$26.400,00	\$33.440,00	\$36.960,00	
with ATS(Optional)	add	\$1.260,80	\$1.260,80	\$1.592,00	\$1.592,00	\$1.592,00	
with heat recovery system(Optional)	add	\$8.320,00	\$8.448,00	\$8.800,00	\$9.200,00	\$10.080,00	
with soundproof enclosure(Optional)	add	\$3.520,00	\$3.520,00	\$3.680,00	\$4.000,00	\$4.000,00	
With grid synchronization(Optional)	add	\$8.000,00	\$8.000,00	\$8.000,00	\$8.000,00	\$8.000,00	

GENERADORES AQL-GENSET						
Configuration and Quotation on Biogas Generator Sets (20/127V, 60Hz, 3P4W) (Cummins Engine & Leroy Semor Alternator)						
	Standby(kVA)	124	138	165	206	
Item	Model	AQL124	AQL138	AQL165	AQL206	
Spec.	standby power	kVA/kWe	124/99	138/110	165/132	206/165
	prime power	kVA/kWe	113/90	125/100	150/120	188/150
	continous power	kVA/kWe	90/72	100/80	120/96	150/120
	frequency	Hz	60	60	60	60
	rated voltage	V	220	220	220	220
	rated current	A	162,4	180,4	216,5	270,6
	power factor	COSφ	0,8	0,8	0,8	0,8
Engine	brand	—	Cummins brand-new gas engine			
	model	—	R-6LTAA	R-6LTAA	R-NTAA855	R-NTAA855
	displacement	L	8,3	8,9	14	14
	speed	RPM	1800	1800	1800	1800
	compression ratio	—	10:1	10:1	10:1	10:1
	bore*stroke	mm*mm	114*135	114*145	140*152	140*152
	cooling method	—	water cooled	water cooled	water cooled	water cooled
	oil capacity	L	18,9	18,9	36	36
	oil cooler	—	with	with	with	with
	mixer	—	IMPACO, USA	IMPACO, USA	IMPACO, USA	IMPACO, USA
	ignition system	—	made in Canada	made in Canada	made in Canada	made in USA
	speed governor	—	WOODWARD	WOODWARD	WOODWARD	WOODWARD
	biogas filter	—	KromSchroeder, Germany			
	biogas pres. reducer (optional)	—	Fiorentini, Italy	Fiorentini, Italy	Fiorentini, Italy	Fiorentini, Italy
Alternator	brand	—	Leroy Somer	Leroy Somer	Leroy Somer	Leroy Somer
	phase	—	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires
	connecting method	—	SAE standard	SAE standard	SAE standard	SAE standard
	way of excitation	—	brushless, self-excitation			
	insulation grade	—	H level	H level	H level	H level
	controller type	—	SmartGen Digital Controller			
	display	—	LCD	LCD	LCD	LCD
	fuel	—	biogas	biogas	biogas	biogas
	gas inlet pressure	kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa
	dimension (open type)	mm*mm*mm	2460*1010*1700	2460*1010*1700	2900*1200*1850	2900*1200*1850
	net weight (open type)	kg	1500	1500	2200	2200
	soundproof enclosure	—	optional	optional	optional	optional
	protection level	—	IP23	IP23	IP23	IP23
	warranty period	hrs.	4000	4000	4000	4000
	biogas consumption	m3/kW.h	0,58	0,55	0,58	0,55
	electrical efficiency ±2%	%	33,00	34,00	34,00	34,00
	thermal efficiency ±2%	%	52,00	53,00	53,00	53,00
total efficiency ±2%	%	85,00	86,00	86,00	86,00	
FOB GERMANY	US\$	\$42.240,00	\$47.520,00	\$52.800,00	\$70.400,00	
with ATS(Optional)	add	\$2.054,40	\$2.054,40	\$2.214,40	\$2.280,00	
with heat recovery system(Optional)	add	\$11.440,00	\$12.320,00	\$13.200,00	\$14.080,00	
with soundproof enclosure(Optional)	add	\$4.480,00	\$4.480,00	\$5.600,00	\$5.760,00	
With grid synchronization(Optional)	add	\$8.000,00	\$8.000,00	\$8.000,00	\$8.000,00	

GENERADORES AQL-GENSET					
Configuration and Quotation on Biogas Generator Sets (Cummins Engine & Leroy Semor Alternator, 220/127V, 60Hz, 3P4W)					
	Standby(kVA)	263	618	798	
Item	Model	AQL263	AQL618	AQL798	
Spec.	standby power	kVA/kWe	263/210	618/495	798/638
	prime power	kVA/kWe	239/191	563/450	725/580
	continous power	kVA/kWe	191/153	450/360	580/464
	frequency	Hz	60	60	60
	rated voltage	V	220	220	220
	rated current	A	626,6	1476,2	1902,7
	power factor	COSφ	0,8	0,8	0,8
Engine	brand	—	Cummins brand-new gas engine		
	model	—	R-KTAA19	R-KTAA38	R-KTAA50
	displacement	L	19	37,8	50,3
	speed	RPM	1800	1800	1800
	compression ratio	—	10:1	10:1	10:1
	bore*stroke	mm*mm	159*159	159*159	159*159
	cooling method	—	water cooled	water cooled	water cooled
	oil capacity	L	38	114	151
	oil cooler	—	with	with	with
	mixer	—	IMPACO, USA	IMPACO, USA	IMPACO, USA
	ignition system	—	WOODWARD/ ALTRONIC	WOODWARD	WOODWARD
	speed governor	—	GAC/ WOODWARD	WOODWARD	WOODWARD
	biogas filter	—	KromSchroeder, Germany		
biogas pres. reducer (optional)	—	Fiorentini, Italy	Fiorentini, Italy	Fiorentini, Italy	
Alternator	brand	—	Leroy Somer	Leroy Somer	Leroy Somer
	phase	—	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires
	connecting method	—	SAE standard	SAE standard	SAE standard
	way of excitation	—	brushless, self-excitation		
	insulation grade	—	H level	H level	H level
	controller type	—	SmartGen Digital Controller		
	display	—	LCD	LCD	LCD
	fuel	—	biogas	biogas	biogas
	gas inlet pressure	kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa
	dimension (open type)	mm*mm*mm	3240*1300*1920	4600*2060*2380	4800*2200*2400
	net weight (open type)	kg	4630	7500	9800
	soundproof enclosure	—	optional	optional	optional
	protection level	—	IP23	IP23	IP23
	warranty period	hrs.	4000	4000	4000
	biogas consumption	m3/kW.h	0,53	0,53	0,53
	electrical efficiency ±2%	%	35,00	35,00	35,00
	thermal efficiency ±2%	%	53,00	53,00	53,00
	total efficiency ±2%	%	87,00	87,00	87,00
FOB GERMANY	US\$	\$130.900,00	\$329.000,00	\$525.000,00	
with ATS(Optional)	add	—	—	—	
with heat recovery system(Optional)	add	\$16.100,00	\$31.570,00	\$46.970,00	
with soundproof enclosure(Otional)	add	\$10.500,00	\$17.500,00	\$21.700,00	
With grid synchronization(Optional)	add	\$8.400,00	\$14.000,00	\$14.000,00	



## Anexo VI - Caracterización y descripción del sistema

### VI.1 Rangos de potencia de un grupo electrógeno

Los rangos de potencia<sup>109</sup> de los grupos electrógenos son publicados por los fabricantes y describen las condiciones de carga máximas permisibles que tiene el mismo. Las condiciones mínimas de carga vienen establecidas por los fabricantes en un 30% del rango de potencia de trabajo del generador. Los rangos de potencia que emplean mayoritariamente los grupos electrógenos son los siguientes:

#### Rango de Potencia Standby

El rango de potencia standby se aplica en instalaciones servidas por la red eléctrica en situaciones de emergencia, esto es, cuando el conjunto generador sirve como respaldo debido a una interrupción de la energía suministrada por la red. Este rango es el de mayor potencia disponible y no dispone de capacidad de sobrecarga. Además, este rango sólo contempla cargas variables con un factor de carga promedio al 70 por ciento de la potencia standby por un máximo de 200 horas de operación al año. Con este rango de potencia no se permite la operación en paralelo con la red. Para las aplicaciones que requieran una operación en paralelo con la red, debe utilizarse el rango de potencia primaria o el de potencia continua.

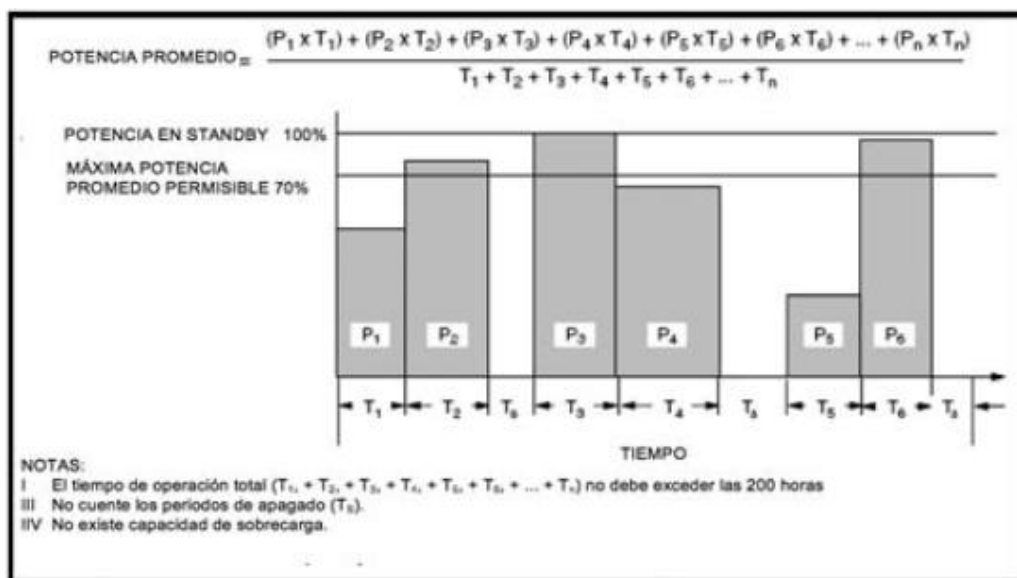


Figura 78: Rango de potencia standby. Fuente: Manual de Aplicación Cummins Power Generation

<sup>109</sup> Fuente: Manual de Aplicación para Conjuntos Generadores enfriados con Líquido de la marca Cummins Power Generation.

**Rango de Potencia Primaria**

El rango de potencia primaria se aplica cuando se suministra energía eléctrica en lugar de la energía comprada comercialmente. El número de horas de operación permisibles por año es ilimitado para aplicaciones de carga variable pero está limitada para aplicaciones de carga constante. El caso que suscita un mayor interés es el que la potencia primaria está disponible para un número ilimitado de horas de operación al año en aplicaciones de carga variable. Las aplicaciones que requieren de la operación en paralelo con algún servicio público con carga constante están sujetas a limitaciones de tiempo de operación. En aplicaciones de carga variable, la carga promedio no debe exceder del 70 por ciento del rango de potencia primaria durante 24 horas de operación. Se dispone de una capacidad de sobrecarga del 10 por ciento por un periodo de 1 hora en un periodo de operación de 12 horas, pero no debe exceder de 25 horas al año.



Figura 79: Rango de potencia primaria con tiempo de operación ilimitado. Fuente: Manual de aplicación Cummins Power Generation

**Rango de Potencia Continua**

El rango de potencia continua se aplica cuando hay que suministrar potencia continuamente a una carga hasta el 100 por ciento de la capacidad base por horas ilimitadas. En este rango no se dispone de capacidad de sobrecarga. Este rango se aplica en la operación de cargas continuas del servicio público. En estas aplicaciones, los conjuntos generadores operan en paralelo con una fuente de servicio público y bajo cargas constantes por periodos prolongados.



Figura 80: Rango de potencia continua. Fuente: Manual de aplicación Cummins Power Generation

## VI.2 - Revisión del caso de la Universidad EARTH en Costa Rica

A continuación se revisa el caso tratado en el artículo "Quantifying electricity generation and waste transformations in a low-cost, plug-flow anaerobic digestion system" elaborado en el año 2008 por Stephanie Lansing, Joaquín Víquez, Helen Martínez, Raúl Botero y Jay Martin. En dicho artículo se analiza el caso de generación de electricidad y transformación de desechos de forma económica mediante un sistema de digestión anaerobia en la Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda (EARTH) en Costa Rica.

El dicho análisis se trató cuatro aspectos:

- I. Análisis de muestras de efluente, producción de biogás y calidad del mismo ( $\text{CH}_4$  y  $\text{H}_2\text{S}$ ), para lo cual fueron tomadas muestras de ambos biodigestores durante nueve meses y fueron comparados estadísticamente.
- II. Determinación de las características del residuo final y comparación con las características del efluente.
- III. Recolección de datos sobre la producción de electricidad y el empleo del biogás combinado de ambos biodigestores.
- IV. Análisis económico para determinar cuándo se recupera la inversión realizada en el sistema de digestión y generación de electricidad.

En la revisión que se va a llevar a cabo en este anexo se describirá el funcionamiento del sistema generador de la Universidad EARTH por considerarse un buen apoyo para plantear como será el sistema generador del matadero municipal de Cochabamba. Además, se expondrán las conclusiones de dicho artículo en cuanto a producción de electricidad debido a que el empleo de un motor sobredimensionado lo convierte en un caso de interés y que concierne al proyecto que se va a realizar en el matadero municipal de Cochabamba.

En la Universidad EARTH se dispone de un sistema de tratamiento de residuos que sirve como fuente de metano, el cual se emplea para la generación de electricidad. Dicho sistema está formado por dos biodigestores, uno destinado al tratamiento de las excretas de los cerdos y otro al de las excretas de las vacas. En el primer biodigestor se producen 27,5 [m<sup>3</sup>/día] de biogás con un porcentaje de metano del 62,6% y se reduce el 86% de la materia orgánica (DQO), mientras que en el segundo se producen 6 [m<sup>3</sup>/día] de biogás con un 76,4% de metano y reducción de DQO de 92%. El biogás generado en ambos biodigestores se combina y emplea para generar electricidad en la Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda.

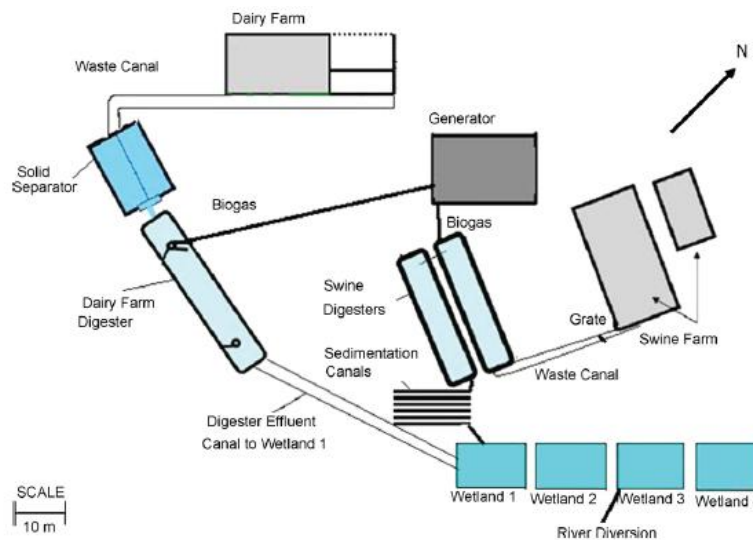


Figura 81: Esquema del sistema de generación de electricidad implantado en Costa Rica.  
Fuente: Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda

Debido a la presión generada en el interior de los biodigestores, el biogás fluye y se almacena en dos tanques de polietileno tubular de distintas capacidades. Para almacenar el biogás generado en el biodigestor de desechos porcinos se emplea un tanque de almacenamiento de 149 m<sup>3</sup>, mientras que para el biogás generado en el biodigestor de desechos bovinos se emplea uno de 107 m<sup>3</sup>. El biogás se combina y transporta empleando una bomba de vacío hasta una torre de absorción de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) para la remoción del mismo.

Tras la remoción llevada a cabo en la torre de absorción, el biogás se almacena en un nuevo tanque de polietileno tubular de 107 m<sup>3</sup>, desde donde es comprimido y transportado a una presión de 34 kPa hasta un motor de encendido por chispa adecuado para funcionar con biogás. Dicho motor forma parte de un conjunto generador cuya potencia es de 40 kW y es un prototipo específico desarrollado por Cummins para



aplicaciones de generación de electricidad a pequeña escala. Su adquisición no supuso ningún coste para la Universidad EARTH debido a que formó parte de una donación.



*Figura 82: Motor de encendido provocado a gas natural modificado para operar con biogás.  
Fuente: Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda*

Dicho generador no fue conectado a la red eléctrica ya que fue usado como generador autónomo para cubrir el pico de demanda eléctrica que se produce durante las dos horas que dura el ordeñado de las vacas. Durante esas dos horas operan cuatro ordeñadoras, un tanque refrigerador de leche, una prensa de caña de azúcar y una trituradora.

El generador produce únicamente la cantidad de electricidad que demanda la granja. Para ello funciona aproximadamente durante 2 horas al día, 5 días a la semana y durante las 2 horas en que coinciden con el ordeñado de las vacas ya que es cuando se produce el pico de demanda diaria. Dicho pico está en torno a 12,9 kW, para los cuales se requiere un consumo de biogás de 28,7 m<sup>3</sup> (consumo de 2,2 m<sup>3</sup> de biogás por kW generado). Los dos biodigestores de la granja producen conjuntamente 33,5 [m<sup>3</sup>/día] de biogás, logrando con ello cubrir el 81,8% del pico de demanda eléctrica. Esto corresponde a 1 hora y 38 minutos de funcionamiento del generador.

El pico de demanda de la granja se cubre únicamente con el 32% de la potencia del generador de 40 kW. El fabricante indicó que dicho generador funcionando a potencia nominal tiene una eficiencia eléctrica del 35% que da como resultado un consumo de biogás de 0,44 [m<sup>3</sup>/kW]. En el caso que tiene lugar actualmente en el que se consumen 28,7

$\text{m}^3$  de biogás para cubrir 12,9 kW de demanda el generador opera con una eficiencia del 6,6%. Por tanto, se trata de un equipo sobredimensionado y cuya única ventaja se presenta en el aspecto económico ya que no se invirtió nada en adquirirlo. El análisis de dicho artículo desvela que un equipo más adecuado debería tener una potencia de 15 kW ya que cubriría adecuadamente el pico de demanda y se rentabilizaría en un plazo menor.

Las conclusiones más interesantes para caracterizar el funcionamiento de sistema generador del matadero municipal de Cochabamba giran en torno a la caída en la eficiencia eléctrica del generador de la Universidad EARTH. Los datos experimentales presentados por la universidad EARTH muestran un generador que alimenta a una carga al 32% de su potencia nominal. Esta condición de funcionamiento hace que su eficiencia eléctrica se reduzca de un 35% a un 6,6%. Se aprecia por tanto una reducción de 28,4 puntos en la eficiencia eléctrica. Por otro lado, se sabe que la eficiencia eléctrica comienza a caer de manera dramática cuando el generador funciona a menos del 50% de su potencia nominal. En el sistema de la Universidad la carga es del 32%, 18 puntos menos que el límite de 50% a partir del cual la eficiencia empieza a caer. Esto permite ver que la eficiencia cae aproximadamente 1,6 puntos por cada punto de reducción de la carga. Esto se cumpliría si se tiene en cuenta una relación lineal entre la eficiencia del generador y la carga que alimenta, cosa que no es cierta. Una reducción en la carga conllevará una reducción cada vez mayor de la eficiencia, lo cual dificulta el estudio de dicha variable. Será necesario apoyarse en información cedida por el fabricante para poder conocer la eficiencia eléctrica cuando el generador trabaja con cargas de trabajo menores al 50%.

### VI.3 Estudio de la disponibilidad de biogás para la alimentación del motor

En primer lugar se consideran los datos presentados en el apartado 7.3 según los cuales el motor consume  $174,59 \text{ m}^3$  de biogás durante las 8 horas de faeneo y  $84,48 \text{ m}^3$  de biogás durante las 4 horas posteriores al mismo. Esto permite definir los siguientes caudales:

**Caudal de biogás consumido por el generador (Faeneo) =  $21,82 \text{ [m}^3/\text{h]}$**

**Caudal de biogás consumido por el generador (Post Faeneo) =  $21,12 \text{ [m}^3/\text{h]}$**

Por otro lado se considera el dato presentado en el apartado 4.4.1 según el cual la caldera consume un total de  $272,6 \text{ m}^3$  durante 12 horas de funcionamiento. Esto permite definir el siguiente caudal de consumo para la caldera:

**Caudal de biogás consumido por la caldera =  $21,72 \text{ [m}^3/\text{h]}$**

Por último, para poder tratar los datos de producción de biogás presentados en el apartado 7.3.2, se considerará que la generación es constante en cada franja. De esta forma se obtiene una producción de biogás del 0,028% para cada hora de la primera franja horaria (00:01-6:00), del 0,061% para cada hora de la segunda franja horaria (6:01-12:00), del 0,052% para cada hora de la tercera franja horaria (12:01-18:00), y del 0,025% para cada hora de la cuarta franja horaria (18:01-00:00).

Estas consideraciones permiten estudiar la disponibilidad de biogás y comprobar la viabilidad de suministro al motor:

Franja horaria	Producción de biogás (%)	Biogás generado (m <sup>3</sup> )	Biogás consumido generador (m <sup>3</sup> )	Biogás consumido caldera (m <sup>3</sup> )	Biogás consumido total (m <sup>3</sup> )	Balance (m <sup>3</sup> )
0:00-1:00	0,028	18,21	0	0	0	18,21
1:00-2:00	0,028	18,21	0	0	0	18,21
2:00-3:00	0,028	18,21	0	0	0	18,21
3:00-4:00	0,028	18,21	0	0	0	18,21
4:00-5:00	0,028	18,21	0	0	0	18,21
5:00-6:00	0,028	18,21	0	0	0	18,21
6:00-7:00	0,061	39,53	0	0	0	39,53
7:00-8:00	0,061	39,53	21,82	21,72	43,54	-4,02
8:00-9:00	0,061	39,53	21,82	21,72	43,54	-4,02
9:00-10:00	0,061	39,53	21,82	21,72	43,54	-4,02
10:00-11:00	0,061	39,53	21,82	21,72	43,54	-4,02
11:00-12:00	0,061	39,53	21,82	21,72	43,54	-4,02
12:00-13:00	0,053	34,28	21,82	21,72	43,54	-9,26
13:00-14:00	0,053	34,28	21,82	21,72	43,54	-9,26
14:00-15:00	0,053	34,28	21,82	21,72	43,54	-9,26
15:00-16:00	0,053	34,28	21,12	21,72	42,84	-8,56
16:00-17:00	0,053	34,28	21,12	21,72	42,84	-8,56
17:00-18:00	0,053	34,28	21,12	21,72	42,84	-8,56
18:00-19:00	0,025	16,32	21,12	21,72	42,84	-26,52
19:00-20:00	0,025	16,32	0	0	0	16,32
20:00-21:00	0,025	16,32	0	0	0	16,32
21:00-22:00	0,025	16,32	0	0	0	16,32
22:00-23:00	0,025	16,32	0	0	0	16,32
23:00-00:00	0,025	16,32	0	0	0	16,32

Tabla 82: Estudio del suministro al motor

Se puede apreciar que durante el funcionamiento del motor el ritmo de consumo de biogás es mayor que el ritmo de generación. Por tanto, se produce un déficit de biogás que deberá ser cubierto con el biogás que se produce durante las horas en las que el motor no está en funcionamiento.

Para garantizar el suministro de biogás al motor durante su franja horaria de funcionamiento se requieren 100,07 m<sup>3</sup> de dicho combustible gaseoso. Dado que durante las doce horas en las que no funciona el motor se producen 230,36 m<sup>3</sup> de biogás, se concluye que no habrá problemas para abastecer al motor. Será necesario que el sistema de tratamiento de las aguas residuales incluya unos depósitos para almacenar el biogás durante las horas en las que el mismo no se consuma. Esto no supone un inconveniente debido a que dicho sistema está pensado para almacenar los excedentes de biogás sin un uso asignado.

#### VI.4 Cálculo del equipo necesario para el consumo de excedentes

Tras comprobar que el grupo electrógeno seleccionado para cubrir la demanda de matadero no consume la totalidad del biogás disponible para generar electricidad, se analiza la posibilidad de comprar un grupo electrógeno adicional para consumir dicho biogás. La electricidad generada ya no iría destinada a cubrir el consumo de los equipos del matadero sino que debería ser inyectada a la red o suministrada a algún particular con el objetivo de obtener ingresos. Los excedentes de biogás de los que se dispone para este segundo grupo electrógeno son 109,3 [m<sup>3</sup>/día]. Se calcula en primer lugar la potencia nominal que debería tener el nuevo equipo generador:

Excedentes de biogás	109,33	m <sup>3</sup> /día
PCI biogás	5,21	kWh/m <sup>3</sup>
Energía disponible del biogás	569,45	kWh/día
Eficiencia del grupo electrógeno	30	%
Energía eléctrica obtenible	170,83	kWh/día
Programa de funcionamiento	6	h/día
Potencia nominal requerida	28,47	kW
<b>Potencia nominal requerida en altitud</b>	<b>36,16</b>	<b>kW</b>

Tabla 83: Determinación de la potencia del equipo para consumo de excedentes

Los cálculos se han realizado considerando que el programa de trabajo de este nuevo equipo es de 6 horas diarias. Se trataría de la franja horaria de 18:00 a 00:00 que es la franja de mayor consumo diario en Bolivia<sup>110</sup> y en donde se contemplaría la venta de electricidad. Además se ha considerado una eficiencia eléctrica del 30% por considerarse válida para los grupos electrógenos con los que se está tratando al funcionar con un biogás con contenido del 55% en metano. También se ha tenido en cuenta la pérdida de potencia del equipo debido a la altura<sup>111</sup> y calculada en un 27%.

<sup>110</sup> Dato suministrado por ELFEC S.A.

<sup>111</sup> Calculado bajo el criterio del ratio de variación de densidad en el Anexo V.5

Se concluye que se debe seleccionar un grupo electrógeno de unos 36,16 kW para poder obtener a la salida los 28,47 kW de potencia que permitan consumir todos los excedentes de biogás en 6 horas de funcionamiento. Se opta por el modelo inmediatamente superior en potencia primaria del catálogo de generadores Aqualimpia. Corresponde al modelo AQL55 cuyas especificaciones son las siguientes:

<b>GENERADOR AQL GENSET – MODELO AQL55</b>		
<b>ESPECIFICACIONES</b>		
Potencia Standby	55/44	kVA/kWe
Potencia Primaria	50/40	kVA/kWe
Potencia Continua	40/32	kVA/kWe
Frecuencia	60	Hz
Tensión nominal	220	V
Corriente nominal	72,2	A
Factor de potencia	0,8	cos $\phi$
<b>MOTOR</b>		
Marca	Cummins brand-new gas engine	
Modelo	R-4BTAA	
Desplazamiento	3,9	L
Velocidad	1800	rpm
Ratio de compresión	10:1	
Diámetro*Carrera	102*120	mm*mm
Refrigeración	Agua	
Capacidad de aceite	9,5	L
Refrigeración de aceite	Incluida	
Mezclador	IMPCO, USA	
Sistema de ignición	Made in Canada	
Controlador de velocidad	WOODWARD	
Filtro de biogás	KromSchroeder, Germany	
Reductor de presión (opcional)	Fiorentini, Italy	
<b>ALTERNADOR</b>		
Marca	Leroy Somer	
Fases	3	
Método de conexión	SAE standard	
Modo de excitación	Autoexcitado sin escobillas	
Grado de aislamiento	H	
<b>OTROS DATOS</b>		
Tipo de controlador	SmartGen Digital Controller	
Display	LCD	
Combustible	Biogás	
Presión del gas a la entrada	1 - 5,5	kPa
Dimensiones	1950*1000*1450	mm*mm*mm
Peso neto	1000	kg
Recinto insonorizado	Opcional	
Nivel de protección	IP23	

<b>Periodo de garantía</b>	4000	h
<b>Consumo de biogás</b>	0,55	m <sup>3</sup> /kWh
<b>Eficiencia eléctrica (±2%)</b>	33	%
<b>Eficiencia térmica (±2%)</b>	52	%
<b>Eficiencia total (±2%)</b>	85	%
<b>PRECIOS</b>		
<b>FOB Germany</b>	21.120,00	US\$
<b>con ATS (opcional)</b>	1.260,80	US\$
<b>con sistema recuperador de calor (opcional)</b>	8.320,00	US\$
<b>con recinto insonorizado (opcional)</b>	3.520,00	US\$
<b>con red de sincronización (opcional)</b>	8.000,00	US\$

Tabla 84: Especificaciones grupo electrógeno para el consumo de excedentes

Como se ha dicho, el grupo electrógeno trabajará alimentando aproximadamente a 28,5 kilovatios de potencia lo que implica un funcionamiento a una carga cercana al 65% de la nominal del equipo. Una carga del 65% implica que no hay una reducción en la eficiencia eléctrica (reducción que ocurriría si se alimenta una carga menor al 50% de la potencia nominal del equipo). Por tanto la eficiencia se mantiene al 30% que se ha considerado inicialmente, validando las cuentas iniciales que nos aseguran el consumo de los excedentes de biogás.

Se considera como precio de venta de la electricidad el mismo que el Mercado Eléctrico Mayorista Boliviano paga a las generadoras termoeléctricas, el cual es de 0,03 [US\$/kWh]<sup>112</sup>. Se trata de un precio bajísimo que no es atractivo para ningún proyecto privado, pero que es el que se aplica en la actualidad. Con ello se puede ver cuando se amortizaría este segundo grupo electrógeno.

Energía eléctrica generada	170,83	kWh/día
Precio de venta del kWh	0,03	US\$/kWh
Ganancias diarias	5,12	US\$/día
Coste grupo electrógeno AQL55	21120	US\$
<b>Amortización</b>	<b>4121</b>	<b>días</b>

Teniendo en cuenta que el matadero opera un promedio de 26 días al mes, la amortización del equipo llevaría más de 13 años. Además esta amortización ha sido calculada de manera optimista ya que se ha considerado un precio de venta que se aplica a empresas generadoras, cuando el matadero actuaría como autoprodutor que inyecta a red, hecho que le llevaría a percibir menos ingresos. Además para este sencillo análisis solo se ha considerado el gasto en la compra del grupo electrógeno y no se han tenido en

<sup>112</sup> Dato suministrado por la empresa Guabirá Energía, empresa generadora que actualmente inyecta energía eléctrica al Sistema Interconectado Nacional (SIN).

cuenta el resto de elementos que conformarían el sistema generador (Filtros, tanque de almacenamiento, obra civil, etc). Por tanto la amortización será aun mayor y supondría un gasto difícil de afrontar para el matadero teniendo en cuenta que sería el segundo grupo electrógeno adquirido por la empresa. En vista de esto se desaconseja la compra de un segundo equipo hasta conseguir amortizar el primero o se consiga una fuente externa de financiación.

## VI.5 Estimación del volumen del biodigestor del matadero

A continuación se emplea la metodología existente para el diseño de biodigestores familiares de bajo costo para estimar el volumen del biodigestor que permita tratar la totalidad de las aguas residuales del matadero municipal de Cochabamba. Esta estimación no es de utilidad para el diseño de dicho biodigestor debido a que el mismo será de distinto tipo para adecuarlo al sustrato del matadero. Los cálculos realizados a continuación se fundamentan en la guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares (J.Martí Herrero, 2008).

En una instalación ganadera, se comenzaría estimando el estiércol disponible para alimentar el biodigestor y se consideraría que se mezcla con una cantidad de agua tres veces superior. Para el caso del matadero se dispone del dato de las aguas residuales, el cual es de 162.500 litros diarios:

$$\text{Carga diaria} = 162500 \text{ [L/día]}$$

El siguiente paso sería evaluar las condiciones climáticas para decidir cuál debe ser el tiempo de retención del biodigestor que se va a construir. El tiempo de retención es el tiempo que permanece el sustrato dentro del biodigestor siendo sometido al proceso de digestión anaerobia. Esta variable viene determinada por la temperatura que se logre alcanzar dentro del biodigestor, la cual depende principalmente de las condiciones climáticas del emplazamiento. La digestión anaerobia tiene lugar de forma óptima cuando la temperatura alcanzada dentro del biodigestor es de en torno a 30-35°C, temperatura que se puede alcanzar en zonas tropicales de manera natural. Cuando la temperatura se aleja del rango óptimo es necesario un tiempo de retención mayor para que tenga lugar la digestión anaeróbica de toda la materia orgánica.

Para el emplazamiento del matadero municipal de Cochabamba el tiempo de retención óptimo ya ha sido determinado mediante las pruebas realizadas en los biodigestores actuales, siendo este de 27 días:

**Tiempo retención = 27 días**

Cociendo la carga diaria y el tiempo de retención de la misma en el biodigestor se puede determinar el volumen líquido del biodigestor empleando la siguiente relación:

$$V_L = \text{Carga diaria} \cdot \text{Tiempo retención}$$

Si se considera que en el biodigestor se formará una campana de gas que supondrá el 25% del volumen total (Un tercio del volumen líquido) se puede determinar el volumen gaseoso del biodigestor empleando la siguiente relación:

$$V_G = \frac{V_L}{3}$$

Finalmente, el volumen total que tendrá el biodigestor será la suma del volumen líquido y el volumen gaseoso:

$$V_T = V_L + V_G$$

Los cálculos para la totalidad de las aguas del matadero para el tiempo de retención óptimo del emplazamiento se incluyen en la siguiente tabla:

Carga diaria	162500 L/día
Tiempo de retención	27 días
Volumen líquido ( $V_L$ )	4387500 L
	4387,5 m <sup>3</sup>
Volumen gas ( $V_G$ )	1462500 L
	1462,5 m <sup>3</sup>
<b>Volumen total (<math>V_L + V_G</math>)</b>	<b>5850 m<sup>3</sup></b>

Se obtiene un volumen total de 5850 m<sup>3</sup>, dato que se puede considerar una aproximación del volumen que tendrá el futuro biodigestor del matadero. Se aprecia que el biodigestor necesario será de gran tamaño, algo que ya se presuponía debido a la gran carga volumétrica de aguas residuales que genera el matadero diariamente.