

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**ESCUELA DE POSGRADO**



**ANÁLISIS TERMOECONÓMICO DE LA UNIDAD DE COMPRESIÓN DE GAS  
NATURAL (UCGN) DE UNA ESTACIÓN DE CARGA DE GAS NATURAL  
COMPRIMIDO (GNC), MEDIANTE EL METODO EXERGY, COST, ENERGY,  
MASS (EXCEM) PARA DETERMINAR LA RELACIÓN EXISTENTE ENTRE  
LA EFICIENCIA EXÉRGICA DE LA UCGN Y EL COSTO DE  
PRODUCCIÓN DE GNC**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE  
MAGISTER EN ENERGÍA**

**AUTOR:**

Ing. Jesús Edgar Maraví Camargo

**ASESOR:**

Mg. Fernando Octavio Jimenez Ugarte

Agosto, 2018

## RESUMEN

El elevado costo de los combustibles líquidos en la actualidad y la alta contaminación producto de su combustión, hace necesario buscar nuevas alternativas energéticas. En consecuencia, el gas natural se presenta como la mejor alternativa para reducir costos energéticos con bajo impacto ambiental. Estos fundamentos son los que conllevan a la búsqueda de alternativas de solución al suministro energético diferenciado tal como el Gas Natural Comprimido (GNC). En el presente documento se realiza el estudio Másico, Energético, Exergético y de Costos (EXCEM por sus siglas en Inglés) de una Unidad de Compresión de Gas Natural (UCGN), componente principal de una Estación de Carga de GNC) con el Objetivo de determinar los costos de producción del GNC y su variación respecto de variables operativas del equipo. Para esto se estableció la siguiente hipótesis: **“El incremento de la Eficiencia Exergética de la Unidad de Compresión de Gas Natural de una Estación de Carga de GNC reduce del costo de producción de GNC.”** Basados en esto se plantea como objetivo principal determinar la relación existente entre la Eficiencia Exergética de la UCGN en una Estación de carga de GNC y el costo de producción de GNC. Para llegar al objetivo principal se plantean como objetivos secundarios identificar los subsistemas energéticos de la UCGN, así como sus Flujos de Energía mediante una metodología de evaluación aplicable a sistemas energéticos (EXCEM) para que a través del establecimiento de las Bases Teóricas que gobiernan el funcionamiento de la UCGN se puedan determinar sus principales parámetros de funcionamiento y cuantificar los procesos de conversión de Energía y como estos influyen en los costos asociados a la producción de GNC. Los resultados de este estudio se basan en tres puntos de operación los cuales permiten determinar un análisis de sensibilidad del Costo Exergético de GNC y la Eficiencia Exergética de la UCGN en donde se demuestra que la hipótesis planteada en esta tesis es correcta. Finalmente, como conclusión principal se establece que la reducción del Costo de producción de GNC para un ciclo de trabajo es proporcional al incremento de la eficiencia exergética del sistema.



*(Dedico y ofrezco este trabajo al Padre  
Todo Poderoso, al hijo Jesucristo nuestro  
señor, al Espíritu Santo, a la Santísima  
Virgen Maria y todas las personas que  
siempre confiaron en mí y alentaron mi  
esfuerzo)*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, a mi Esposa, a mis dos hijos y a mis padres, que me brindaron el apoyo necesario en todo momento, así mismo agradezco a mis profesores de la universidad que consolidaron mi formación académica, resaltando el apoyo de mi asesor que siempre estuvo dispuesto y diligente para llevar a cabo el desarrollo de ésta tesis.



# ÍNDICE

## INTRODUCCIÓN

Pág.

Carátula.....	i
Resumen.....	ii
Índice.....	v
Lista de Simbolos y Abreviaturas.....	viii
Lista de Tablas.....	xviii
Lista de Figuras.....	xiv
Introducción.....	1

## CAPÍTULO I

### DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....22

1.1 Descripción del sistema de producción de GNC.....	22
1.1.1 Descripción del Fluido a Procesar.....	22
1.1.2 Descripción del Sistema Integral.....	23
1.1.3 Descripción de Sub Sistemas principales y sus Volúmenes de Control...25	
1.1.3.1 Motor de Combustión Interna (MCI).....	25
1.1.3.2 Sistema de Enfriamiento del MCI (SEMCI).....	28
1.1.3.3 Compresor de Gas Natural (CGN).....	28
1.1.3.4 Sistema de Enfriamiento del CGN (SECGN).....	30

## CAPÍTULO II

### BASES TEÓRICAS.....31

2.1 Definiciones.....	31
2.2 Ley de Conservación de la Masa.....	33
2.3 Primera Ley de la Termodinámica.....	34

2.4	Segunda Ley de la Termodinámica.....	35
2.5	Exergía.....	36
2.6	Metodología EXCEM.....	43
2.7	Termoeconomía.....	45

### **CAPÍTULO III**

#### **APLICACIÓN DEL MÉTODO EXCEM AL SISTEMA.....48**

3.1	Balance de Masa.....	48
3.1.1	Balance de Masa para el Motor de Combustión Interna (MCI).....	48
3.1.2	Balance de Masa para el Sistema de Enfriamiento del MCI (SEMCI).....	50
3.1.3	Balance de Masa para el Compresor de Gas Natural (CGN).....	51
3.1.4	Balance de Masa para el Sistema de Enfriamiento del CGN (SECGN).....	52
3.2	Balance de Energía.....	54
3.2.1	Balance de Energía para el Motor de Combustión Interna (MCI).....	54
3.2.2	Balance de Energía para el Sistema de Enfriamiento del MCI (SEMCI).....	55
3.2.3	Balance de Energía para el Compresor de Gas Natural (CGN).....	56
3.2.4	Balance de Energía para el Sistema de Enfriamiento del CGN (SECGN).....	57
3.3	Balance de Exergía.....	58
3.3.1	Balance de Exergía para el Motor de Combustión Interna (MCI).....	58
3.3.2	Balance de Exergía para el Sistema de Enfriamiento del MCI (SEMCI).....	59
3.3.3	Balance de Exergía para el Compresor de Gas Natural (CGN).....	59
3.3.4	Balance de Exergía para el Sistema de Enfriamiento del CGN (SECGN).....	60
3.4	Balance de Costos.....	60
3.4.1	Balance de Costos para el Motor de Combustión Interna (MCI).....	61
3.4.2	Balance de Costos para el Sistema de Enfriamiento del MCI (SEMCI).....	62
3.4.3	Balance de Costos para el Compresor de Gas Natural (CGN).....	62
3.4.4	Balance de Costos para el Sistema de Enfriamiento del CGN (SECGN).....	63

## **CAPÍTULO IV**

### **DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....64**

4.1 Parámetros y Resultados del Balance de Masa.....64

4.2 Parámetros y Resultados del Balance de Energía.....69

4.3 Parámetros y Resultados del Balance de Exergía.....79

4.4 Parámetros y Resultados del Balance de Costos.....88

## **CAPITULO V**

### **ANÁLISIS TERMOECONÓMICO.....91**

5.1 Determinación de la relación existente entre eficiencia de la UCGN y costos de producción de GNC.....91

**CONCLUSIONES.....98**

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....101**

**APÉNDICES.....102**

## LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

$\dot{M}_{gncomb.}$	Masa de gas natural combustible
$\dot{M}_{ge}$	Masa de gases de escape
$\dot{M}_{irt}$	Masa de ingreso al radiador del turbo
$\dot{M}_{srt}$	Masa de salida al radiador del turbo
$\dot{M}_{rt}$	Masa de refrigerante del turbo
$\dot{M}_{irm}$	Masa de ingreso al radiador del motor
$\dot{M}_{srm}$	Masa de salida al radiador del motor
$\dot{M}_{rm}$	Masa de refrigerante del motor
$\dot{M}_{art}$	Masa de aire de radiador del turbo
$\dot{M}_{arm}$	Masa de aire de radiador del motor
$\dot{M}_{aSEMCI}$	Masa de aire del SEMCI
$\dot{M}_{igncomp.}$	Masa de ingreso del gas natural de compresión
$\dot{M}_{sgncomp.}$	Masa de salida del gas natural de compresión
$\dot{M}_{gncomp.}$	Masa de gas natural de compresión
$\dot{M}_{a1e-1}$	Masa de aire de primera etapa 1
$\dot{M}_{a1e-2}$	Masa de aire de primera etapa 2
$\dot{M}_{a2e-1}$	Masa de aire de segunda etapa 1
$\dot{M}_{a2e-2}$	Masa de aire de segunda etapa 2
$\dot{M}_{aSECGN.}$	Masa de aire de SECGN
$\dot{Q}_{comb.}$	Calor de combustión
$\dot{Q}_{gncomb.}$	Calor de gas natural de combustión
$\dot{Q}_{oil}$	Calor de aceite
$\dot{Q}_{acomb.}$	Calor de aire de combustión
$\dot{W}_{mMCI}$	Potencia mecánica del MCI
$\dot{Q}_{ge}$	Calor de gases de escape
$\dot{Q}_{rt}$	Calor del radiador del turbo
$\dot{Q}_{rm}$	Calor del radiador del motor
$\dot{Q}_{pMCI}$	Calor de pérdidas del MCI

$\dot{Q}_{pMCI}$	Calor de pérdidas del MCI
$\dot{W}_{eSEMCI}$	Potencia eléctrica del SEMCI
$\dot{Q}_{aSEMCI}$	Calor del aire del SEMCI
$\dot{K}_{aSEMCI}$	Energía Cinética del aire del SEMCI
$\dot{Q}_{pSEMCI}$	Calor de pérdidas del SEMCI
$\dot{W}_{mCGN}$	Potencia Mecánica del CGN
$\dot{Q}_{1e}$	Calor de primera etapa
$\dot{Q}_{2e}$	Calor de segunda etapa
$\dot{Q}_{pCGN}$	calor de pérdidas de CGN
$\dot{W}_{aSECGN}$	Potencia de extracción de aire del SECGN
$\dot{Q}_{aSECGN}$	Calor del aire del SECGN
$\dot{K}_{aSECGN}$	Energía Cinética del aire del SECGN
$\dot{Q}_{pSECGN}$	Calor de Pérdidas del SECGN
$\dot{X}_{gncomb.}$	Exergía del gas natural de combustión
$\dot{X}_{acomb.}$	Exergía del aire de combustión
$\dot{X}_{oil}$	Exergía de la combustión del aceite
$\dot{X}_{\dot{W}_{mMCI}}$	Exergía de la potencia mecánica del MCI
$\dot{X}_{\dot{Q}_{ge}}$	Exergía del calor de gases de escape
$\dot{X}_{\dot{Q}_{rt}}$	Exergía del radiador del turbo
$\dot{X}_{\dot{Q}_{rm}}$	Exergía del radiador del motor
$\dot{X}_{pMCI}$	Exergía de perdidas del MCI
$\dot{X}_{dMCI}$	Exergía destruida del MCI
$\dot{X}_{\dot{W}_{aSEMCI}}$	Exergía de la potencia de extracción del aire del SEMCI
$\dot{X}_{\dot{Q}_{aSEMCI}}$	Exergía del calor del aire de SEMCI
$\dot{X}_{\dot{k}_{aSEMCI}}$	Exergía cinética del aire del SEMCI
$\dot{X}_{pSEMCI}$	Exergía de perdidas de calor del SEMCI
$\dot{X}_{dSEMCI}$	Exergía de destrucción del SEMCI
$\dot{X}_{\dot{W}_{mCGN}}$	Exergía de la potencia mecánica del CGN
$\dot{X}_{\dot{Q}_{1e}}$	Exergía del calor de primera etapa
$\dot{X}_{\dot{Q}_{2e}}$	Exergía del calor de segunda etapa
$\dot{X}_{pCGN}$	Exergía de perdidas de calor del CGN
$\dot{X}_{dCGN}$	Exergía destruida del CGN
$\dot{X}_{\dot{W}_{aSECGN}}$	Exergía de la potencia de extracción del aire del SECGN
$\dot{X}_{\dot{Q}_{aSECGN}}$	Exergía del calor del aire de SECGN
$\dot{X}_{\dot{k}_{aSECGN}}$	Exergía cinética del aire del SECGN
$\dot{X}_{pSECGN}$	Exergía de perdidas de calor del SECGN
$\dot{X}_{dSECGN}$	Exergía de destrucción del SECGN
$\dot{C}_{gn}$	Costo del gas natural
$\dot{C}_{MCI}$	Costo del MCI
$\dot{C}_{\dot{x}_{dMCI}}$	Costo de la exergía de destrucción del MCI
$(\dot{C}_{ee})$	Costo de la energía eléctrica

$\dot{C}_{CGN}$	Costo del compresor de gas natural
$\dot{C}_{\dot{x}_{ACGN}}$	Costo de la exergía de destrucción del CGN
$\dot{C}_{SECGN}$	Costo del SECGN
$\dot{C}_{\dot{x}_{ASECGN}}$	Costo de exergía destruida del SECGN
$R_{a/c}$	Relación aire combustible
$\Delta h_{acomb.}$	Entalpía de aire combustible
$w_{acomb.}$	Humedad relativa del aire combustible
$\Delta h_{H_2O}$	Entalía del agua
$n_{MCI}$	Revoluciones del MCI
$T_{MCI}$	Temperatura de superficie del MCI
$C_{p,ge}$	Calor específico de los gases de escape
$T_{i,ge}$	Temperatura de ingreso de gases de escape
$T_{s,ge}$	Temperatura de salida de gases de escape
$\bar{H}_P$	Entalpía de los productos de combustión
$\bar{H}_R$	Entalpía de los reactantes de combustión
$\bar{H}_f^o$	Entalpía de formación
$\Delta \bar{H}$	Variación de entalpía
$\bar{H}_T$	Entalpía a temperatura T
$\bar{H}_{Tref.}$	Entalpía en el estado de referencia
$\dot{C}_{pr}$	Calor específico del refrigerante
$T_{irt}$	Temperatura de ingreso del refrigerante del turbo
$T_{srt}$	Temperatura de salida del refrigerante del turbo
$T_{irm}$	Temperatura de ingreso del radiador del motor
$T_{srm}$	Temperatura de salida del radiador del motor
$V_{eSEMCI}$	Voltaje del SEMCI
$I_{eSEMCI}$	Corriente del SEMCI
$\cos(\theta)_{eSEMCI}$	Factor de Potencia del motor del SEMCI
$\dot{C}_{pa}$	Calor específico del aire
$T_{iaSEMCI}$	Temperatura de ingreso del aire del SEMCI
$T_{saSEMCI}$	Temperatura de salida del aire del SEMCI
$Vel_{aSEMCI}$	Velocidad del aire del SEMCI
$n_{CGN}$	Revoluciones del CGN
$T_{CGN}$	Temperatura de superficie del CGN
$\dot{C}_{p,qn}$	Calor específico del CGN
$T_{s1e}$	Temperatura de salida de primera etapa
$T_{i1e}$	Temperatura de ingreso de primera etapa
$T_{s2e}$	Temperatura de salida de segunda etapa
$T_{i2e}$	Temperatura de ingreso de primera etapa
$V_{eSECGN}$	Voltaje del SECGN
$I_{eSECGN}$	Corriente del SECGN
$\cos(\theta)_{eSECGN}$	Factor de Potencia del motor del SECGN

$T_{sSECGN}$	Temperatura de salida del aire del SECGN
$Vel_{aSECGN}$	Velocidad del aire del SECGN
$\varphi_{gn}$	Factor de Exergía del gas natural
$LHV_{gn}$	Poder Calorífico Inferior del gas natural
$C_{p,ge}$	Calor específico de los gases de escape
$T_o$	Temperatura de referencia
$T_{i,ge}$	Temperatura de ingreso de los gases de escape
$R_{ge}$	Constante universal de los gases
$P_o$	Presión de referencia
$P_{ge}$	Presión de gases de escape
$T_{\dot{Q}_{rt}}$	Temperatura de la superficie del flujo de calor del radiador del turbo
$T_{\dot{Q}_{rm}}$	Temperatura de la superficie del flujo de calor del radiador del motor
$T_{\dot{Q}_{pMCI}}$	Temperatura de la superficie del flujo de calor de pérdidas del MCI
$T_{\dot{Q}_{aSEMCI}}$	Temperatura de la superficie del flujo de calor de aire del SEMCI
$T_{\dot{Q}_{pSEMCI}}$	Temperatura de la superficie del flujo de calor de pérdidas del SEMCI
$T_{\dot{Q}_{1e}}$	Temperatura de superficie de flujo de calor del radiador de primera etapa
$T_{\dot{Q}_{2e}}$	Temperatura de superficie de flujo de calor del radiador de segunda etapa
$T_{\dot{Q}_{pCGN}}$	Temperatura de la superficie del flujo de calor de pérdidas del CGN
$T_{\dot{Q}_{aSECGN}}$	Temperatura de la superficie del flujo de calor de aire del SECGN
$T_{\dot{Q}_{pSECGN}}$	Temperatura de la superficie del flujo de calor de pérdidas del SECGN
$\dot{C}_{\dot{x}_{Q_{gncomb.}}$	Costo de Exergía del Calor de combustión
$\dot{C}_{MCI}$	Costo del MCI
$\dot{C}_{\dot{x}_{W_{mMCI}}$	Costo de la exergía de la potencia mecánica del MCI
$\dot{C}_{\dot{x}_{Q_{ge}}$	Costo de la exergía del calor de los gases de escape
$\dot{C}_{\dot{x}_{Q_{rt}}$	Costo de la exergía del Calor del radiador del turbo
$\dot{C}_{\dot{x}_{Q_{rm}}$	Costo de la exergía del Calor del radiador del motor
$\dot{C}_{\dot{x}_{Q_{pMCI}}$	Costo de la exergía del calor de perdidas del MCI
$\dot{C}_{\dot{x}_{dMCI}}$	Costo de la exergía destruida del MCI
$\dot{C}_{\dot{x}_{W_{aSEMCI}}$	Costo de la exergía de la potencial del aire del SEMCI
$\dot{C}_{SEMCI}$	Costo del SEMCI
$\dot{C}_{\dot{x}_{Q_{aSEMCI}}$	Costo de la exergía del calor de aire del SEMCI
$\dot{C}_{\dot{x}_{k_{aSEMCI}}$	Costo de la exergía cinética del SEMCI
$\dot{C}_{\dot{x}_{Q_{pMCI}}$	Costo de la exergía de pérdidas del SEMCI
$\dot{C}_{\dot{x}_{dSEMCI}}$	Costo de la exergía de destrucción del SEMCI
$\dot{C}_{\dot{x}_{W_{mCGN}}$	Costo de la exergía de la potencia mecánica del CGN
$\dot{C}_{CGN}$	Costo del CGN
$\dot{C}_{\dot{x}_{Q_{1e}}$	Costo de la exergía del calor de la primera etapa
$\dot{C}_{\dot{x}_{Q_{2e}}$	Costo de la exergía del calor de la segunda etapa
$\dot{C}_{\dot{x}_{Q_{pCGN}}$	Costo de la exergía del calor de pérdidas del CGN
$\dot{C}_{\dot{x}_{dCGN}}$	Costo de la exergía de destrucción del CGN
$\dot{C}_{\dot{x}_{W_{mSECGN}}$	Costo de la exergía de la potencia mecánica del SECGN

$T_{QaSECGN}$	Temperatura de la superficie del flujo de calor de aire del SECGN
$T_{QpSECGN}$	Temperatura de la superficie del flujo de calor de pérdidas del SECGN
$\dot{C}_{\dot{x}Qgncomb.}$	Costo de Exergía del Calor de combustión
$\dot{C}_{MCI}$	Costo del MCI
$\dot{C}_{\dot{x}WmMCI}$	Costo de la exergía de la potencia mecánica del MCI
$\dot{C}_{\dot{x}Qge}$	Costo de la exergía del calor de los gases de escape
$\dot{C}_{\dot{x}Qrt}$	Costo de la exergía del Calor del radiador del turbo
$\dot{C}_{\dot{x}Qrm}$	Costo de la exergía del Calor del radiador del motor
$\dot{C}_{\dot{x}QpMCI}$	Costo de la exergía del calor de perdidas del MCI
$\dot{C}_{\dot{x}aMCI}$	Costo de la exergía destruida del MCI
$\dot{C}_{\dot{x}WaSEMCI}$	Costo de la exergía de la potencial del aire del SEMCI
$\dot{C}_{SEMCI}$	Costo del SEMCI
$\dot{C}_{\dot{x}QaSEMCI}$	Costo de la exergía del calor de aire del SEMCI
$\dot{C}_{\dot{x}kaSEMCI}$	Costo de la exergía cinética del SEMCI
$\dot{C}_{\dot{x}QpMCI}$	Costo de la exergía de pérdidas del SEMCI
$\dot{C}_{\dot{x}dSEMCI}$	Costo de la exergía de destrucción del SEMCI
$\dot{C}_{\dot{x}WmCGN}$	Costo de la exergía de la potencia mecánica del CGN
$\dot{C}_{CGN}$	Costo del CGN
$\dot{C}_{\dot{x}Q1e}$	Costo de la exergía del calor de la primera etapa
$\dot{C}_{\dot{x}Q2e}$	Costo de la exergía del calor de la segunda etapa
$\dot{C}_{\dot{x}QpCGN}$	Costo de la exergía del calor de pérdidas del CGN
$\dot{C}_{\dot{x}dCGN}$	Costo de la exergía de destrucción del CGN
$\dot{C}_{\dot{x}WmSECGN}$	Costo de la exergía de la potencia mecánica del SECGN
$\dot{C}_{SECGN}$	Costo del SECGN
$\dot{C}_{\dot{x}Q1e}$	Costo de la exergía del calor de primera etapa
$\dot{C}_{\dot{x}Q2e}$	Costo de la exergía del calor de segunda etapa
$\dot{C}_{\dot{x}QaSECGN}$	Costo de la exergía del calor de aire del SECGN
$\dot{C}_{\dot{x}kaSECGN}$	Costo de la exergía cinética del SECGN
$\dot{C}_{\dot{x}QpSECGN}$	Costo de la exergía del calor de pérdidas del SECGN
$\dot{C}_{\dot{x}dSECGN}$	Costo de la exergía destruida del SECGN
$\eta_X$	Eficiencia Exergética
$\eta_{X_{SISTEMA}}$	Eficiencia Exergética del Sistema
UCGN	Unidad de Compresión de Gas Natural

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.1.1-1:</b> Composición del Gas Natural.....	23
<b>Tabla 5.1-1:</b> Cuadro de Estimación de Tiempos de Llenado.....	92
<b>Tabla 5.1-2:</b> Cuadro de Balance de Costos del MCI.....	92
<b>Tabla 5.1-3:</b> Cuadro de Balance de Costos del SEMCI.....	92
<b>Tabla 5.1-4:</b> Cuadro de Balance de Costos del CGN.....	93
<b>Tabla 5.1-5:</b> Cuadro de Balance de Costos del SECGN.....	93



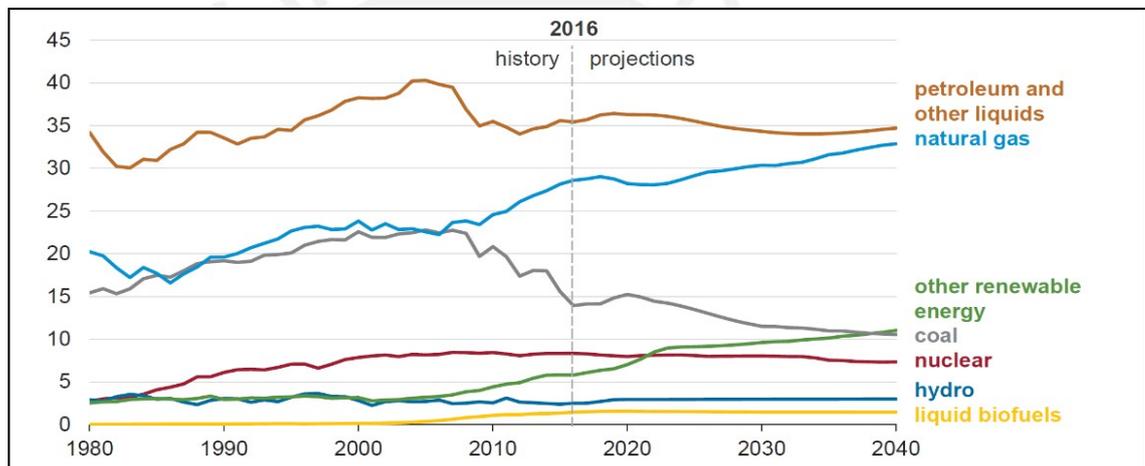
## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b> Panorama Energético Anual 2017 con proyecciones al 2050.....	1
<b>Figura 1-2:</b> Estación de Compresión Típica.....	2
<b>Figura I-1:</b> Estación de carga de GNC.....	4
<b>Figura I-2:</b> Esquema Metodológico para el Análisis Exergético de la ECGN.....	6
<b>Figura I-3:</b> Esquema de bloques de la ECGN.....	9
<b>Figura I-4:</b> Balance Energético Anual de la ECGN.....	13
<b>Figura I-5:</b> Balance Exergético Anual de la ECGN.....	14
<b>Figura I-6:</b> Tabla de Resultados de evaluación termodinámica y económica de cada escenario.....	15
<b>Figura I-7:</b> Representación esquemática del compresor.....	17
<b>Figura I-8:</b> Flujos de calor entre el fluido, las masas sólidas del compresor y el ambiente.....	17
<b>Figura I-9:</b> Representación esquemática de mecanismos de irreversibilidad.....	19
<b>Figura I-10:</b> Comparación de resultados de simulación y experimentales.....	20
<b>Figura I-11:</b> Desglose de pérdidas de Exergía por transferencia de calor fricción, estrangulamiento, y mezcla.....	20
<b>Figura I-12:</b> Comparación de resultados de simulación y experimentales.....	21
<b>Figura 1.1.2-1:</b> Estación de Compresión de Gas Natural.....	24
<b>Figura 1.1.3.1-1:</b> Motor de Combustión Interna a Gas Natural Marca Cummins Modelo KTA19 CG.....	26
<b>Figura 1.1.3.3-1:</b> Imagen Referencial del Compresor de Gas Natural.....	29
<b>Figura 2.2-1:</b> Volumen de Control de Balance de Masa.....	33
<b>Figura 2.3-1:</b> Volumen de Control general.....	34
<b>Figura 2.5.1-1:</b> Componentes Exergéticos.....	36
<b>Figura 2.5.1-2:</b> Esquema general de componentes exergéticos.....	40
<b>Figura 2.6-1:</b> Metodología de Análisis EXEM.....	43
<b>Figura 2.6-2:</b> Aplicación del análisis EXCEM a equipos diversos. a) Bomba; b) Turbina a Vapor; c) Estación de Generación Eléctrica a Carbón.....	44

<b>Figura 2.6-3:</b> Resumen de resultados del análisis EXCEM de cada variable individual para la estación de Generación Eléctrica a Carbón.....	45
<b>Figura 2.7-1:</b> Volumen de Control de balance de Costos.....	46
<b>Figura 3.1.1-1:</b> Volumen de Control de Balance de Masa del Motor de Combustión Interna a Gas Natural.....	49
<b>Figura 3.1.2-1</b> Volumen de Control de Balance de Masa del SEMCI.....	51
<b>Figura 3.1.3-1:</b> Imagen Referencial del Compresor de Gas Natural.....	52
<b>Figura 3.1.4-1:</b> Volumen de Control de Balance de Masa del SECGN.....	53
<b>Figura 3.2.1-1:</b> Volumen de Control del Balance de Energía del MCI.....	54
<b>Figura 3.2.2-1:</b> Volumen de Control del Balance de Energía del SEMCI.....	55
<b>Figura 3.2.3-1:</b> Volumen de Control del Balance de Energía del CGN.....	56
<b>Figura 3.2.4-1:</b> Volumen de Control del Balance de Energía del SECGN.....	57
<b>Figura 5.1-1:</b> Costo Exergético Vs. Presión de Suministro a la UCGN.....	96
<b>Figura 5.1-2:</b> Costo Exergético Vs. Presión de Suministro a la UCGN.....	96
<b>Figura 5.1-3:</b> Relación entre Eficiencia Exergética y Costo Exergético de Producción de GNC de la UCGN basado en los cálculos anexos.....	97

## INTRODUCCION

Mundialmente existe una marcada tendencia por el uso sostenible de recursos energéticos con una demanda creciente de combustibles alternativos al petróleo y las gasolinas para los diferentes procesos industriales [EIA,2017].

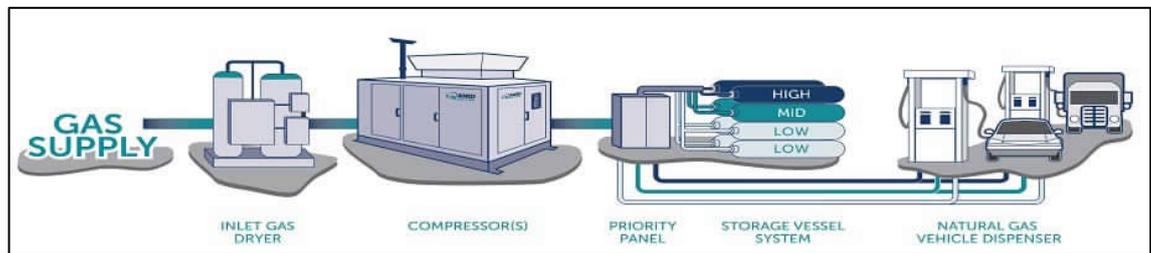


**Figura 1-1:** Panorama Energético Anual 2017 con proyecciones al 2050.

**Fuente:** U.S. Energy Information Administration

En esta coyuntura el Gas Natural se torna la alternativa más amigable por su facilidad en el uso, su bajo impacto ambiental luego de su combustión y su costo menor en comparación con otros combustibles fósiles. El gas natural tiene diferentes usos y aplicaciones en la industria. Entre estos usos y aplicaciones se encuentran, el Gas Natural distribuido por red (GN), el Gas Natural Vehicular (GNV), el Gas Natural Licuado (GNL), el Gas Natural Comprimido (GNC), el Biogas (BG) y el Gas To Liquids (GTL). El GNC en particular es el producto obtenido mediante un proceso de compresión antes de ser transportado y en muchos casos consumido. Los sistemas energéticos requeridos para llevar el GN de línea a ser gas natural comprimido se denominan Unidades de Compresión de Gas Natural (UCGN) y pueden clasificar según su tipo de accionamiento como

UCGN accionados con motores eléctricos de media tensión, UCGN accionados con motores de combustión interna y UCGN accionados con turbinas.



**Figura 1-2:** Estación de Compresión Típica.  
**Fuente:** ANGY ENERGY SYSTEMS LLC.

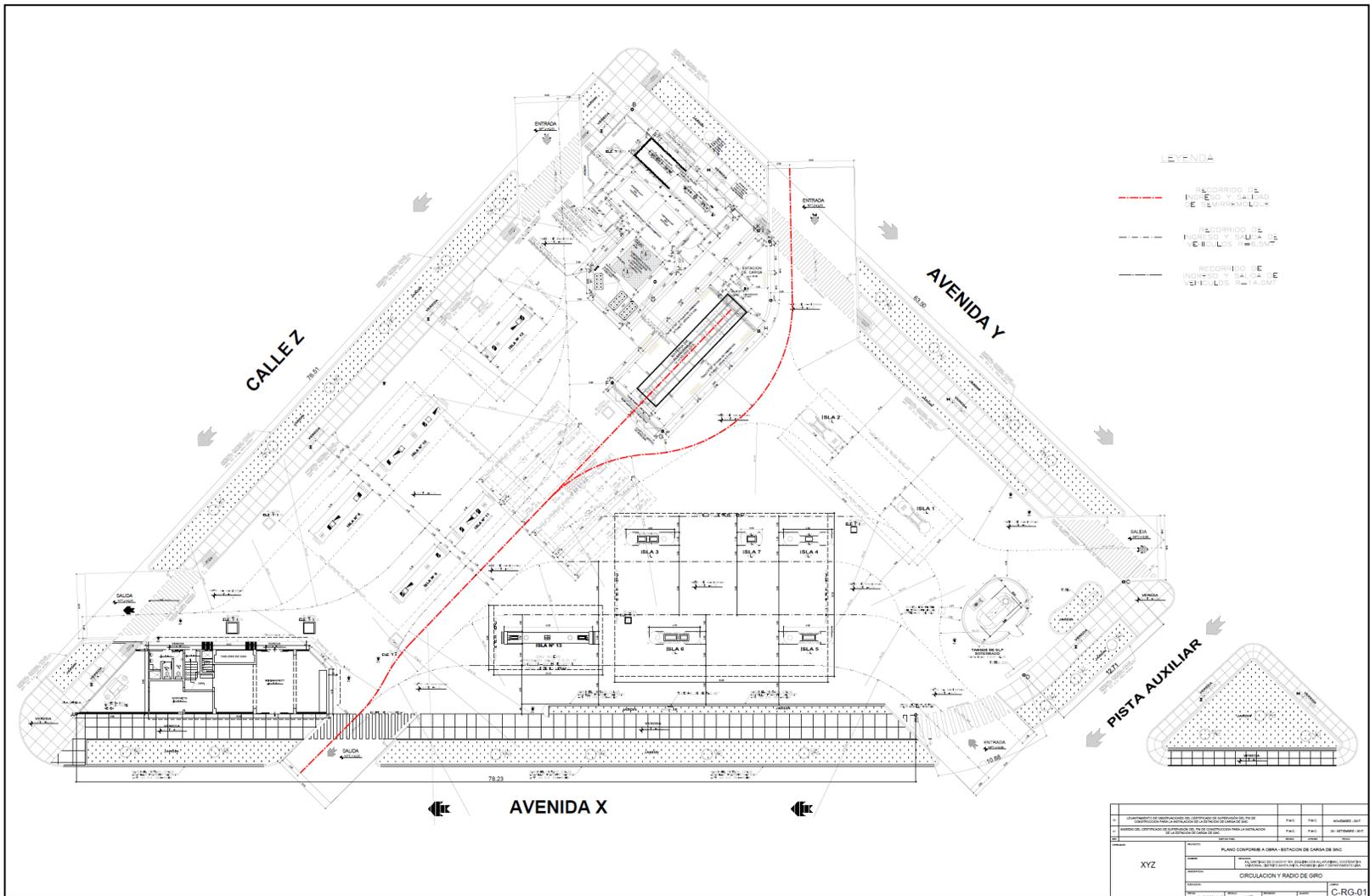
La selección de estos sistemas para el aprovechamiento de este recurso energético, está determinada por diferentes factores acorde a la necesidad de producción, factibilidades de provisión del combustible, así como, el suministro de energía eléctrica, pero, el uso sostenible de esta fuente de energía está intrínsecamente vinculado a la eficiencia de los sistemas que convierten estas materias primas en bienes valiosos y a su tecnología que tiene una influencia directa en la calidad y cantidad de la producción y uso de la energía. Es por ello que se hace indispensable el uso del concepto de Termoeconomía. La Termoeconomía se comprende un análisis de flujos de masa, energía exergía y costos, que sirven para identificar y cuantificar las ineficiencias y beneficios del proceso de conversión de Energía. Esto permite analizar los mecanismos básicos de la eficiencia y costos de cualquier sistema, mediante la aplicación de las leyes de la termodinámica. Por ello, es considerada una herramienta de análisis y evaluación de sistemas, útil en el diseño de soluciones alternativas que busquen reducir la utilización innecesaria de recursos, y por ende los impactos potenciales generados por la misma, orientando así hacia la búsqueda del desarrollo sostenible.

## **Descripción del Problema.**

El caso de estudio de la presente tesis involucra una Estación de Carga de GNC con una capacidad de producción de 5,000 Sm<sup>3</sup>/h. Esta Estación de Carga de GNC tiene como objetivo llenar contenedores de gas natural para que sean transportados a zonas de consumo donde no exista red de distribución de Gas Natural. Esta estación de carga cuenta con una Estación de Filtrado y Medición por donde se recibe el gas natural por red de distribución para ser filtrado y luego medido, luego pasa por una zona de regulación para darle las condiciones de presión necesarias para que pueda ingresar a la zona principal de procesamiento del gas que es la Unidad de Compresión de Gas Natural (UCGN). Esta UCGN está accionada con un Motor de Combustión Interna a Gas Natural de la marca Cummins acoplado a un compresor reciprocante de dos etapas doble de marca Ariel, ambos enfriados por un sistema de succión de aire de tiro forzado. La UCGN comprime el gas desde una presión de suministro entre 27 y 50 barg hasta más de 200 barg, con el fin de llenar contenedores de Gas Natural de diferentes capacidades en la zona denominada Patio de Carga para transportarlo a lugares de consumo donde no existe red de distribución de Gas Natural como se puede apreciar en la Figura 1.1-1. Sin embargo, surge el problema de la falta de identificación y cuantificación las ineficiencias de los procesos de conversión de energía de este sistema que causan la reducción en el valor de la energía útil y el incremento de las pérdidas descargadas en el medio ambiente, lo cual, se ve traducido en la reducción de la eficiencia del sistema y en consumos que influyen en el costo de producción del GNC. En base a lo anterior se plantea la siguiente hipótesis:

El incremento de la Eficiencia Exergética de la Unidad de Compresión de Gas Natural de una Estación de Carga de GNC reduce del costo de producción de GNC.

Siendo la UCGN el componente principal de producción de GNC y de la conversión de energía, se hará las evaluaciones a este componente de la estación de carga para comprobar el impacto de la variación de la eficiencia de la UCGN en el costo de producción de GNC.



**Figura I-1:** Estación de carga de GNC.  
**Fuente:** TECHNOLOGIES & CLEAN ENERGIES S.A.C.

## **Objetivos.**

### **Objetivo Principal.**

- Determinar la relación existente entre la eficiencia de una UCGN en una Estación de carga de GNC y el costo de producción de GNC.

### **Objetivos Secundarios. –**

- Identificar los subsistemas energéticos de la UCGN, así como sus flujos de energía mediante una metodología de evaluación aplicable a sistemas energéticos (EXCEM) para que a través del establecimiento de las Bases Teóricas que gobiernan el funcionamiento de la UCGN se puedan determinar sus principales parámetros de funcionamiento.
- Cuantificar los procesos de conversión de energía para determinar la eficiencia exergética y su influencia en los costos asociados a la producción de GNC.

## **I.3 Metodología.**

Para lograr el objetivo principal se deberá analizar los subsistemas principales de la UCGN la combinación de análisis de conservación de Masa, Energía, Exergía y Cosos, basándose en los principios de la primera y segunda ley de la termodinámica para realizar las evaluaciones cualitativas y cuantitativas en base a parámetros de funcionamiento. Luego se evaluará numéricamente un punto de operación mostrado en los anexos. Para esto, la metodología a seguir es la siguiente:

- Identificar los límites de frontera de la UCGN (y sus subsistemas principales tales como el Motor de Combustión Interna (MCI), el Compresor Gas Natural (CGN), los respectivos Sistemas de Enfriamiento (SE)) y los correspondientes portadores de energía (PE).
- Determinación del marco teórico a utilizar para la evaluación de la UCGN.
- Aplicación de una Metodología reconocida (EXCEM) para la evaluación de los procesos de conversión de energía del sistema.
- Determinación de parámetros de funcionamiento en tres puntos de operación, basados en la presión de suministro de Gas Natural, mediante la adquisición de datos del software del fabricante para la simulación del funcionamiento UCGN que servirá como línea base para la evaluación de otros puntos de operación.
- Determinación de las correlaciones de los balances de masa, energía, exergía y costos con respecto a los procesos de conversión de energía y los costos de producción de GNC.

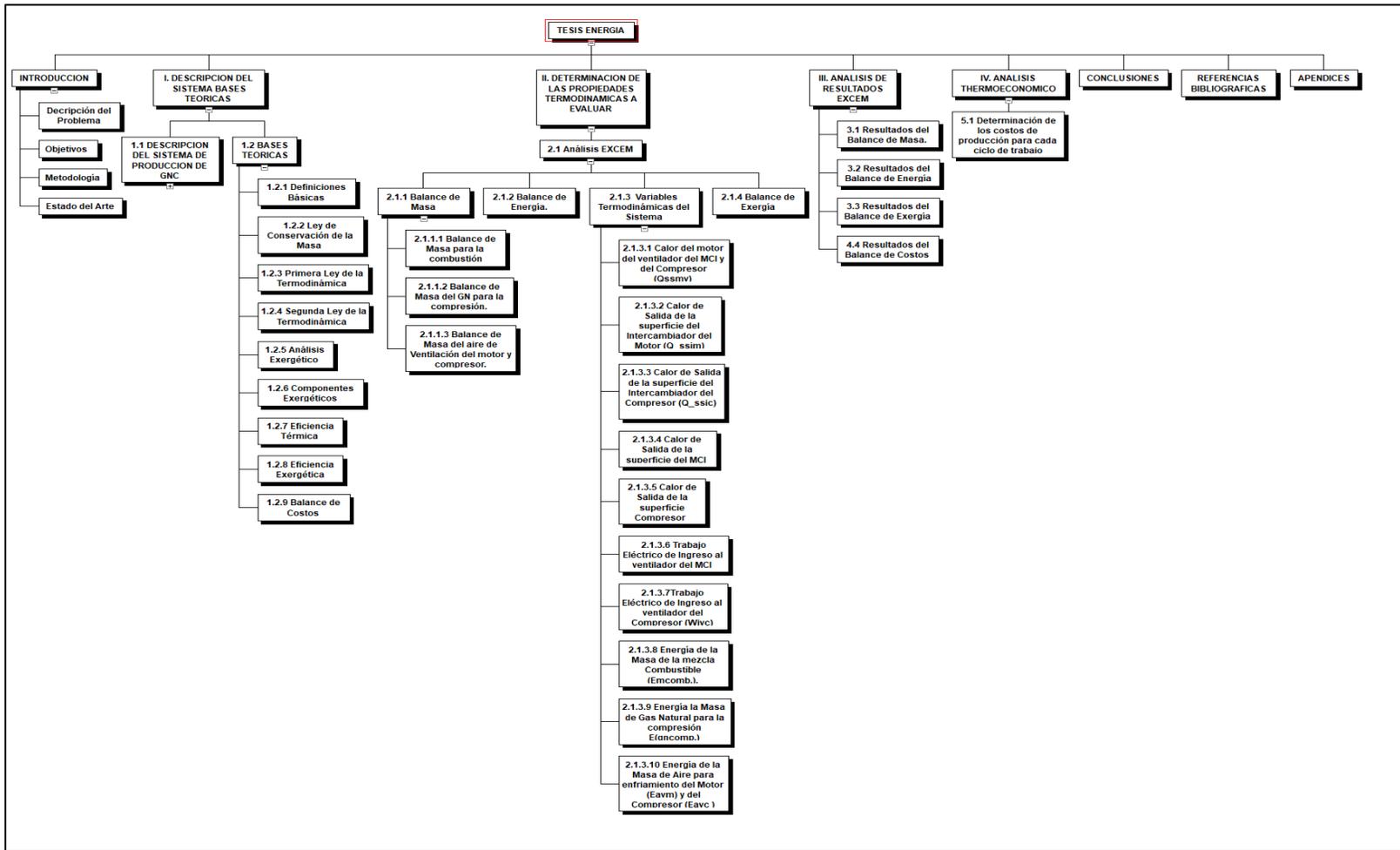


Figura I-2: Esquema Metodológico para el Análisis Exergético de la ECGN.

Fuente: Elaboración Propia.

## **Estado del Arte.**

### **Aplicaciones termoeconómicas en la Industria**

El concepto de Exergía que permite el análisis de costos de energía disponible se conoce desde los años 1800. Según confirmaciones formales, [Enrico Sciubba, 2007], sus principios se originan en el 1824 con base en las definiciones de Carnot que establecen que el trabajo que puede ser extraído de una fuente de calor es proporcional a la diferencia de temperatura entre el reservorio frío y el caliente. Sin embargo, Gibbs (1873), que previamente definió la función termodinámica “energía disponible”, fue el primero que introdujo la noción de trabajo disponible. Pero no fue hasta el año 1953, a razón de la propuesta del Científico Esloveno Zoran Rant, que se empieza a aceptar el término Exergía como la expresión que denota “capacidad de trabajo técnico”. En la actualidad, el significado del término Exergía a evolucionado y ha sido mayormente aceptado como indicador de calidad de energía el cual se define como la máxima cantidad de trabajo disponible que puede obtenerse de la composición del sistema y de su especificado ambiente de referencia [Kotas, 1985], [Dincer y Rosen, 2013]. Así mismo, Rosen y Dincer, establecen que la Exergía es una potente y efectiva herramienta para diseñar y analizar sistemas energéticos, determinar pérdidas y desperdicios a través de magnitudes verdaderas, revelar que tan posibles es diseñar sistemas energéticos más eficientes reduciendo las ineficiencias de los sistemas existentes, abordar el impacto en el ambiente a causa de la utilización de recursos energéticos y ayudar a lograr un desarrollo sostenible. Así mismo, los autores también sostienen que la Exergía es un concepto muy útil en economía. En otros campos tales como la Macroeconomía, el concepto de Exergía ofrece una manera de reducir agotamiento de los recursos y destrucción ambiental mediante impuestos exergéticos; por otro lado, en microeconomía, ha sido beneficiosamente combinado con análisis costo beneficio para mejorar diseños.

## **Casos de análisis exergéticos a ECGN.**

Es muy común que los análisis exergéticos sean muchas veces complejos debido a que se toman en cuenta muchas variables que involucran balances de masa y energía en el marco de la Primera y Segunda Ley de la Termodinámica, así como los mismos equipos, el fluido a utilizar y las condiciones de operación de los elementos a analizar. A continuación, mostraremos algunos casos de estudio donde se realizaron análisis exergéticos en ECGN.

**Caso de Estudio 1:** Energy and Exergy Recovery in natural gas compressor station – A technical and economic analysis.

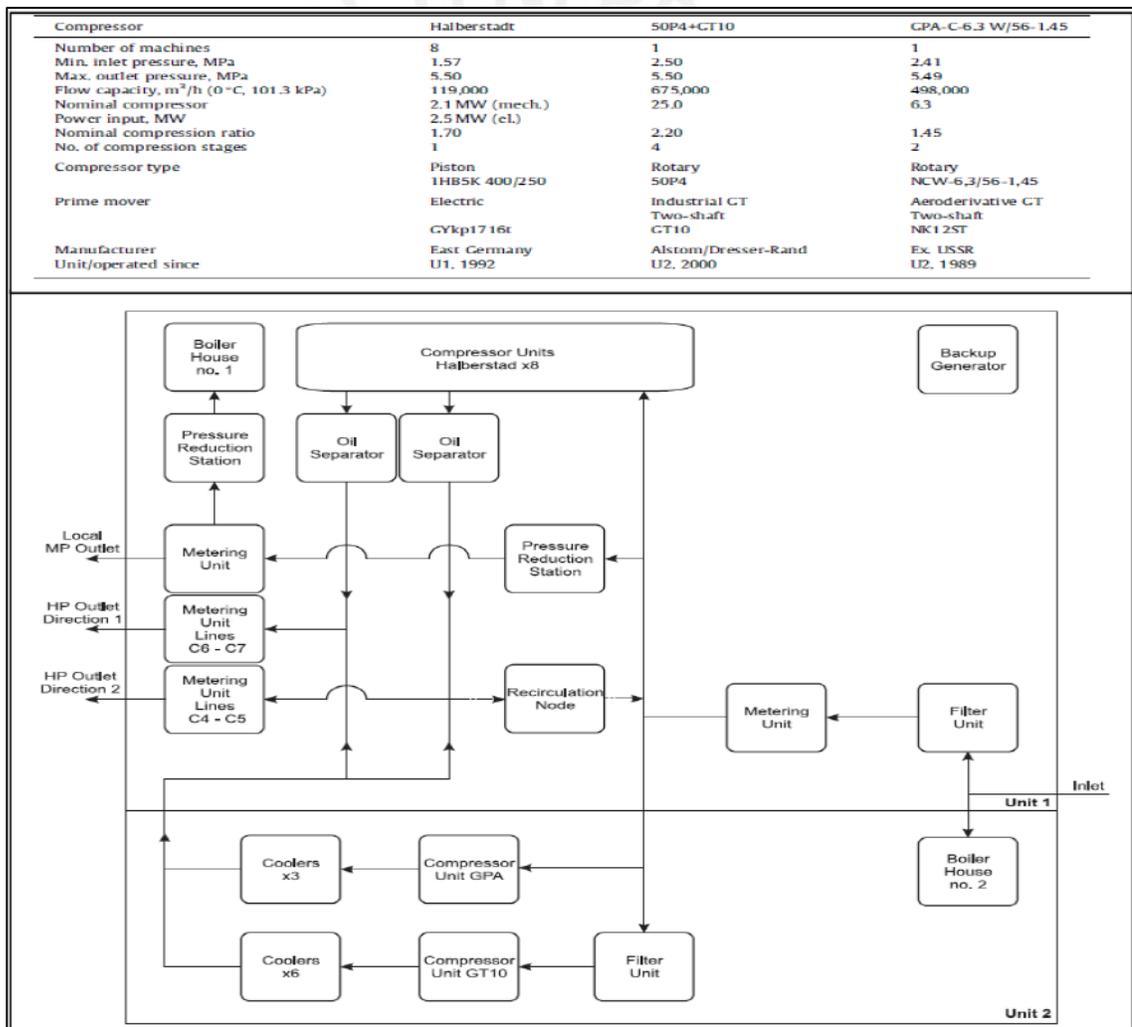
### **Propuesta del autor. –**

Woiciech J. Kotowski en esta publicación del 2015, presenta posibles soluciones a la mejora del desempeño termodinámico de una ECGN. Este sistema consiste en una serie de unidades de compresión operadas a carga parcial. El problema de esta configuración de planta es que los equipos operando a carga parcial conllevan a un significativo decrecimiento de la eficiencia energética y exergética en comparación con el estado de funcionamiento nominal de la maquinaria.

### **Descripción de la ECGN. -**

La estación de compresión consta de dos unidades paralelas U1 y U2 equipadas con diferentes tipos de maquinaria. U1 está equipada con 08 compresores de tipo pistón accionados con motores eléctricos. U2 está equipada con dos unidades rotativas accionadas con turbinas a gas. La capacidad mecánica total instalada es de 51.3 MW y la capacidad de flujo teórico de todas las maquinas es de 2,120,000 m<sup>3</sup>/h. Sin embargo, se debe tener en cuenta que parte de la maquinaria tiene la función de reserva

disponible para asegurar la operación durante O&M o durante posibles fallas por lo que la capacidad operativa constante es de 650,000 m<sup>3</sup>/h. Como se puede apreciar en la Figura I-3 el operador tiene la capacidad de seleccionar el paso de gas que puede ser suministrado a U1 y U2. RN es un nodo de recirculación que permite la descarga de gas natural comprimido retorne al recolector de succión. Típicamente el RN sirve para evitar sobrecargas del compresor. Sin embargo, la recirculación implica significantes pérdidas de energía.

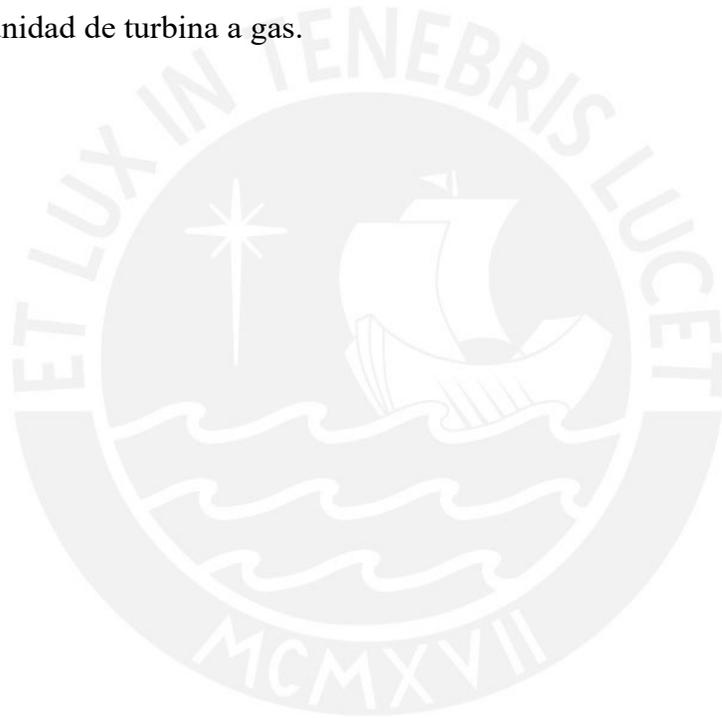


**Figura I-3:** Esquema de bloques de la ECGN.

Fuente: Kotowski, 2015.

Para mejorar el sistema el autor propone 3 alternativas:

1. La instalación de un recuperador de calor generador de agua caliente para cubrir la demanda de calor de la planta.
2. Instalación de un recuperador de calor calentador térmico de aceite para cubrir la demanda de calor de la planta e impulsar un ciclo Rankine orgánico (ORC) para generar energía eléctrica.
3. Instalación de un recuperador de calor calentador térmico de aceite con un ORC y expansores de gas para cambiar a plena carga la operación a plena carga la unidad de turbina a gas.



## **Metodología Seguida en la evaluación. –**

- La metodología seguida involucra un análisis termodinámico y un análisis de factibilidad económica.
- Primero, el análisis termodinámico consta de una evaluación energética, con el fin de establecer el balance de energía del sistema e identificar posibles ahorros de combustible para determinar la producción de energía eléctrica adicional.
- Segundo, se realiza la evaluación exergética para determinar la calidad termodinámica del sistema existente y de las soluciones de modernización propuestas.
- Finalmente, la factibilidad económica se basa en el cálculo del diferencial del flujo de caja y del diferencial del VPN. Esto principalmente se basa en la valoración de la inversión. Finalmente, se utilizan también indicadores de evaluación financiera para determinar la rentabilidad de estas inversiones como son la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Tiempo de Recuperación de la Inversión (TRI).

## **Resultados de la Evaluación. –**

- **Evaluación Energética.**

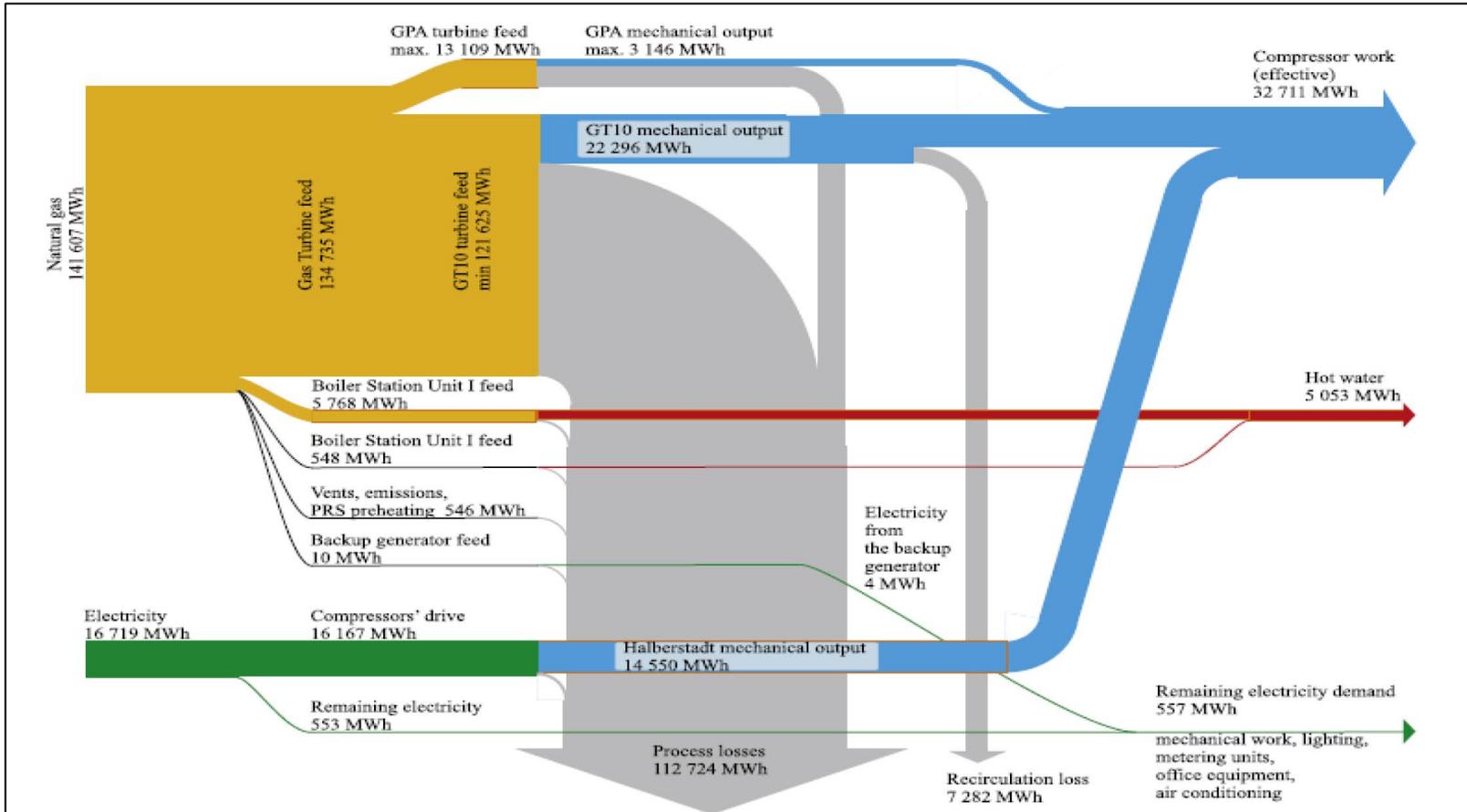
Los resultados de la evaluación Energética Anual para la ECGN se muestran en la Figura I-4 donde se aprecia que la mayor fuente de energía proviene de la energía química del gas natural que es en orden de magnitud más grande que la Energía Eléctrica (EE) comprada. Una de los consumos más elevados es debido a la recirculación de gas comprimido. Así mismo, la mayor pérdida se observa en la conversión de energía química en las turbinas de gas.

- **Evaluación Exergética.**

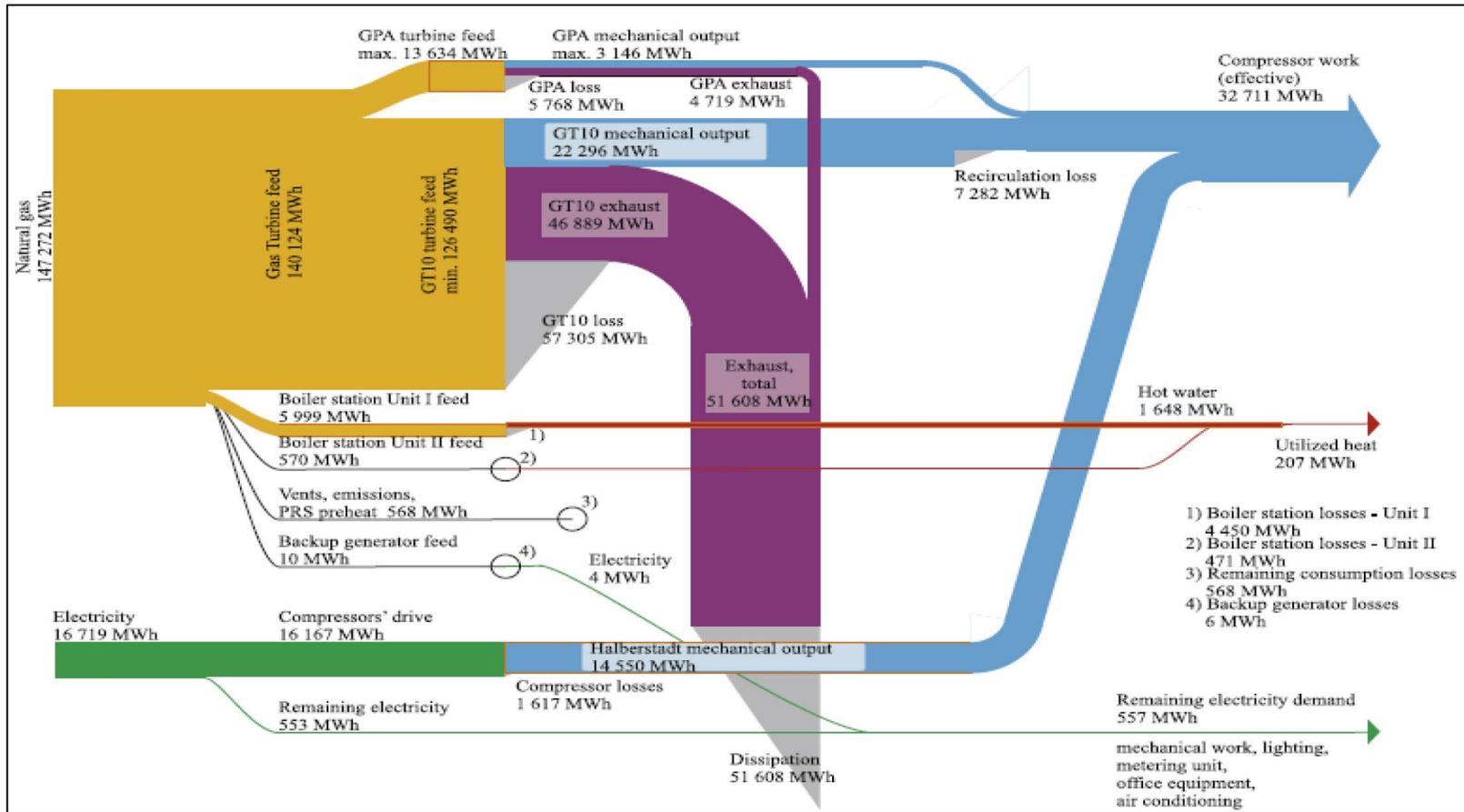
El resultado de la evaluación Exergética que se muestra en la Figura I-5, permite identificar las mayores pérdidas que pueden recuperarse. La Energía contenida en los gases de combustión es aproximadamente 35% de la energía química del gas natural. Así mismo, este balance exergético muestra las pérdidas irrecuperables de Exergía que existen cuando la maquinaria es usada.

- **Evaluación Económica.**

Los resultados de esta evaluación Económica se muestran en la Figura I-6, que para todos los escenarios de propuestas de mejora existe una reducción de costos operativos y mejoras de la eficiencia debido al mejor aprovechamiento del combustible. Por otro lado, la factibilidad económica de algunas inversiones es una limitante en algunos casos debido a la inversión elevada que permitiría la mejora de la eficiencia exergética.



**Figura I-4:** Balance Energético Anual de la ECGN.  
**Fuente:** Kotowski, 2015.



**Figura I-5:** Balance Exergético Anual de la ECGN.  
**Fuente:** Kotowski, 2015.

Parameter	Unit	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
<b>A. Technical data</b>				
HR unit thermal power	kW	4000	21,100	37,500
Installed electric power, total	kW	0	3000	23,075
ORC	kW	-	3000	6000
Expander 1	kW	-	-	75
Expander 2	kW	-	-	12,000
Expander 3	kW	-	-	5000
HR unit full-load operation time	h	3850	3850	7884
<b>B. Thermodynamic evaluation</b>				
1. Replaced heat production	MW h	3780	3780	6450
2. Change in NG consumption (LHV based, 10.054 kW h/m <sup>3</sup> ):				
Boiler stations 1 and 2	MW h	-4203	-4203	-7171
GT10	MW h	0	0	+428,408
3. Change in electricity consumption	MW h	+95	+310	-11,027
4. Electricity production	MW h	0	11,550	160,887
Local energy savings (4 - 3 - 2)	MW h	4108	15,393	-249,323
Primary energy savings <sup>a</sup> [(4 - 3)/ $\eta_{ref}$ - 2]	MW h	3 932	36,318	69,946
Exergy efficiency <sup>b</sup>	%	21.0	28.2	37.0
<b>C. Economic effects</b>				
Total investment cost	k€	1249	9763	22,696
Sub-scenario <sup>a</sup>			pes.      opt.	pes.      opt.
Change in operational Cash Flow	k€	+77	+354      +712	-5 879      -209
NPV (t = 12 a)	k€	-590	-6 661      -3 664	-68 973      -23 958
IRR		<r	<r      <r	-      -
DPB	a	>12	>12      >12	-      -
BEP electricity price	€/MW h	-	138.5      138.5	107.0      107.0

<sup>a</sup>  $\eta_{ref} = 35.0\%$ .  
<sup>b</sup> For the existing CS plant  $\eta_b = 20.4\%$ .

Figura I-6: Tabla de Resultados de evaluación termodinámica y económica de cada escenario.

Fuente: Kotowski, 2015.

## **Conclusiones. –**

Las evaluaciones realizadas al sistema muestran mejoras significativas en el uso de recursos energéticos mediante la identificación de Energía y Exergía disponibles. Sin embargo, se debe evaluar en un horizonte determinado tal que permita establecer una línea de tiempo razonable en la cual se pueda definir el tiempo de recuperación de la inversión de las mejoras.

**Caso de Estudio 2:** An exergy method for compressor performance analysis.

## **Propuesta del autor. –**

McGovern y Harte proponen en su publicación de 1995, un método exergético para analizar el desempeño de un compresor. El propósito de esto es identificar y cuantificar los defectos del uso de la potencia al eje de un compresor. Estos defectos son atribuidos a la fricción, transferencia de calor irreversible, estrangulamiento del fluido y mezcla irreversible del fluido.

## **Descripción del sistema. –**

El sistema consta de un compresor enfriado por aire con acople al motor eléctrico principal mediante faja de transmisión; este consta de dos cilindros, pero el modelo computacional para el análisis se hará solo para un cilindro como se puede apreciar a continuación.

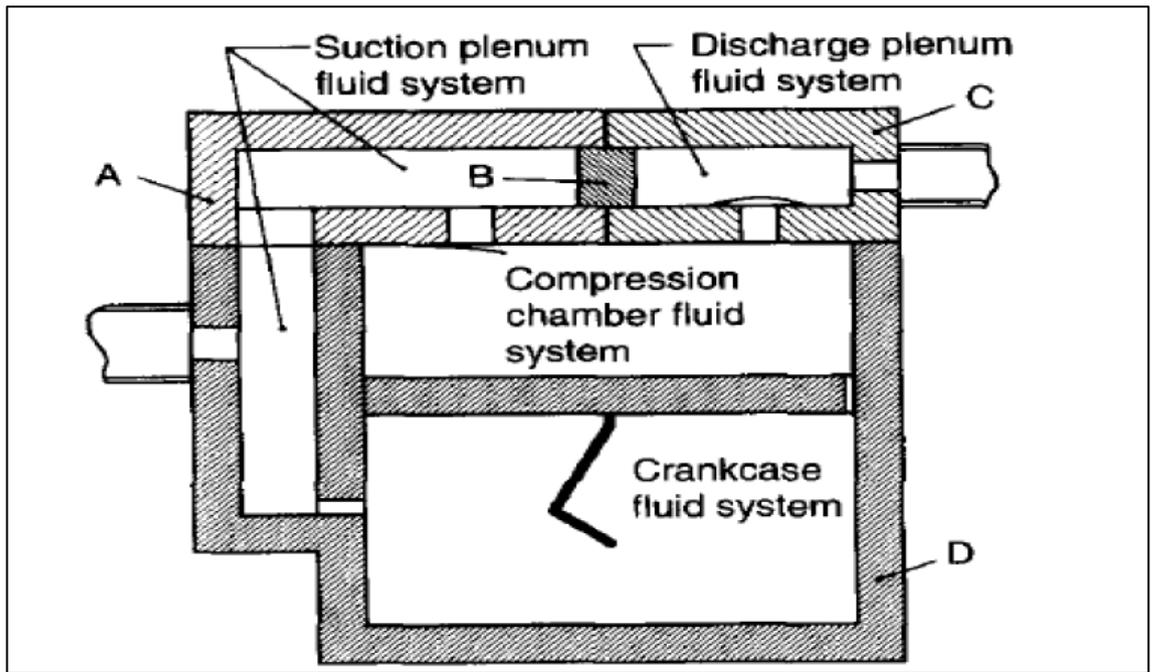


Figura I-7: Representación esquemática del compresor.  
Fuente: McGovern y Harte, 1995.

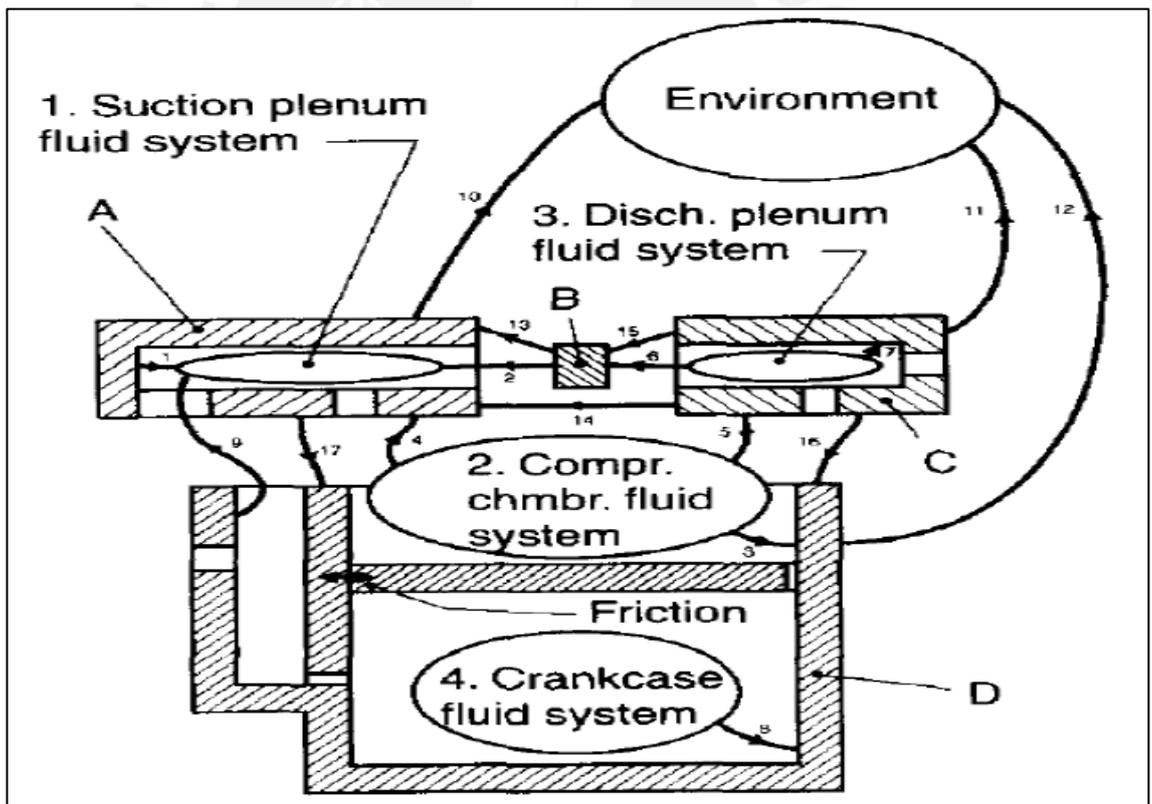


Figura I-8: Flujos de calor entre el fluido, las masas sólidas del compresor y el ambiente.  
Fuente: McGovern y Harte, 1995.

## **Metodología seguida en la evaluación. –**

La metodología seguida en la evaluación consiste en determinar la Exergía de los sistemas dentro del compresor. Los componentes exergéticos a determinar son los siguientes, basados en un modelo computacional y experimental:

- La razón de cambio de Exergía de cada sistema que comprende al compresor.
- La razón de cambio de Exergía entre cada uno de estos sistemas.
- La razón de cambio de Exergía entre el compresor y los sistemas fuera del compresor.

Nota. Para estos análisis se considera las siguientes premisas:

- Se asume que cualquier pequeño volumen de masa del fluido que no haya entrado en equilibrio es demasiado pequeño como para que sea considerado.
- Así mismo, todo fluido que no sea parte del equilibrio del sistema es demasiado pequeño para que sea considerado.
- No hay irreversibilidades asociadas con la expansión o contracción de los límites del sistema.
- Toda transferencia de calor entre la superficie sólida y el sistema del fluido en equilibrio con una finita diferencia de temperaturas. La destrucción de Exergía ocurre en el sistema, pero fuera del sistema en equilibrio in dependientemente de la dirección del flujo de calor.
- Las irreversibilidades del efecto de regulación del fluido ocurren aguas debajo de la restricción presentada.

- Todo fluido que ingresa al sistema implica una regulación adiabática seguida de una transferencia de calor al sistema en equilibrio, la irreversibilidad ocurre dentro del sistema, pero fuera del sistema en equilibrio.

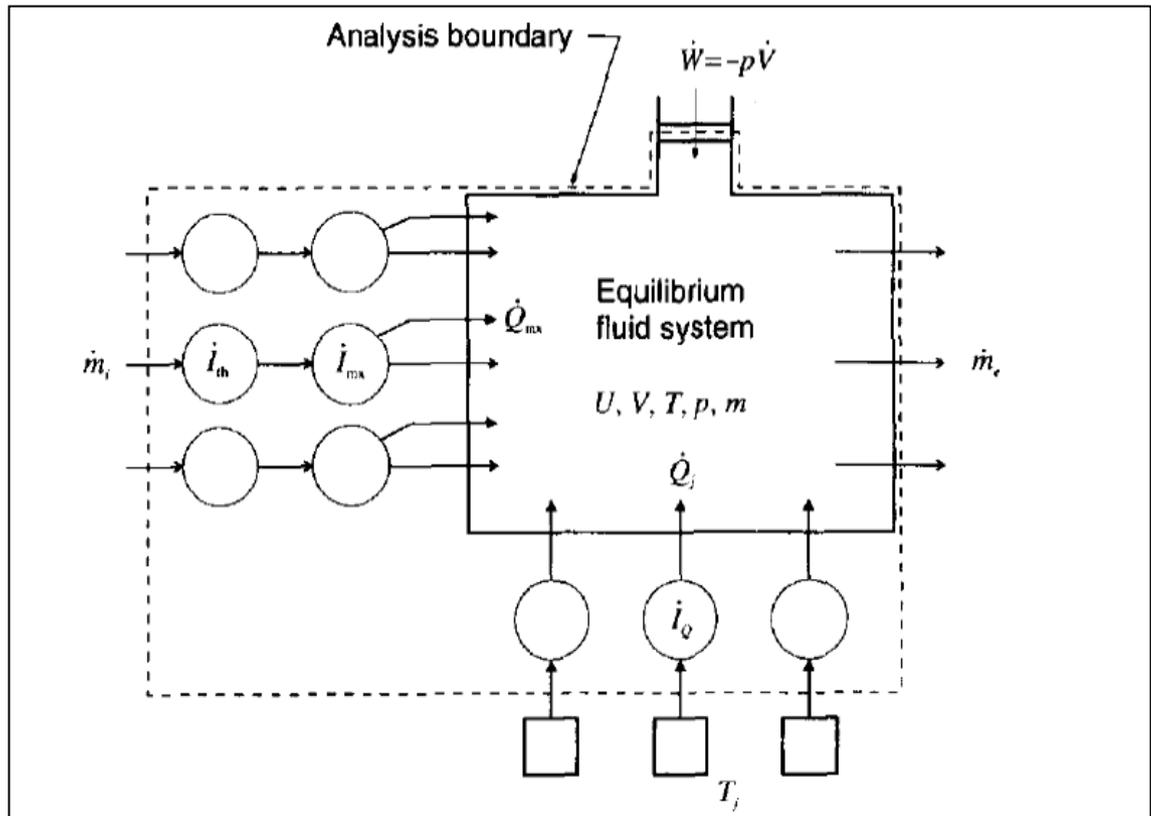


Figura I-9: Representación esquemática de mecanismos de irreversibilidad.  
Fuente: McGovern y Harte, 1995.

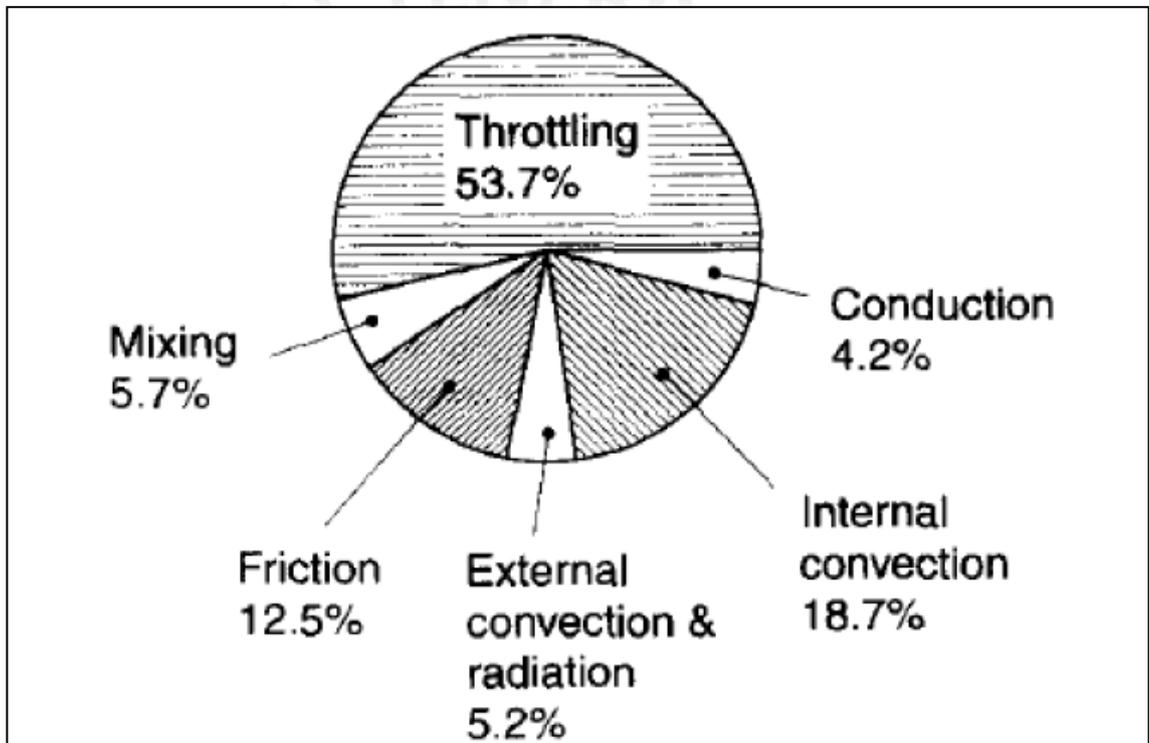
### Resultados de la evaluación. –

La Figura I-10 muestra la comparación de resultados de simulación y experimentales. El valor de destrucción de Exergía más alto es el de estrangulación o regulación seguido por el proceso de convección interna. También, se puede apreciar las diferentes pérdidas de Exergía en cada una de las zonas de análisis teniendo la cámara de compresión y la zona de descarga como las mayores zonas de destrucción de Exergía.

	Experimental results	Simulation results
Shaft power (W)	725	742
Indicated power (W)	674	694
Mass flow rate ( $\text{kg s}^{-1}$ )	0.013	0.0125
Suction plenum exit temperature (K)	298	289
Dsch. plenum exit temperature (K)	358	344
Crankcase temperature (K)	320	321
Energy to environment (W)	200	213

**Figura I-10:** Comparación de resultados de simulación y experimentales.

Fuente: McGovern y Harte, 1995.



**Figura I-11:** Desglose de pérdidas de Exergía por transferencia de calor fricción, estrangulamiento, y mezcla.

Fuente: McGovern y Harte, 1995.

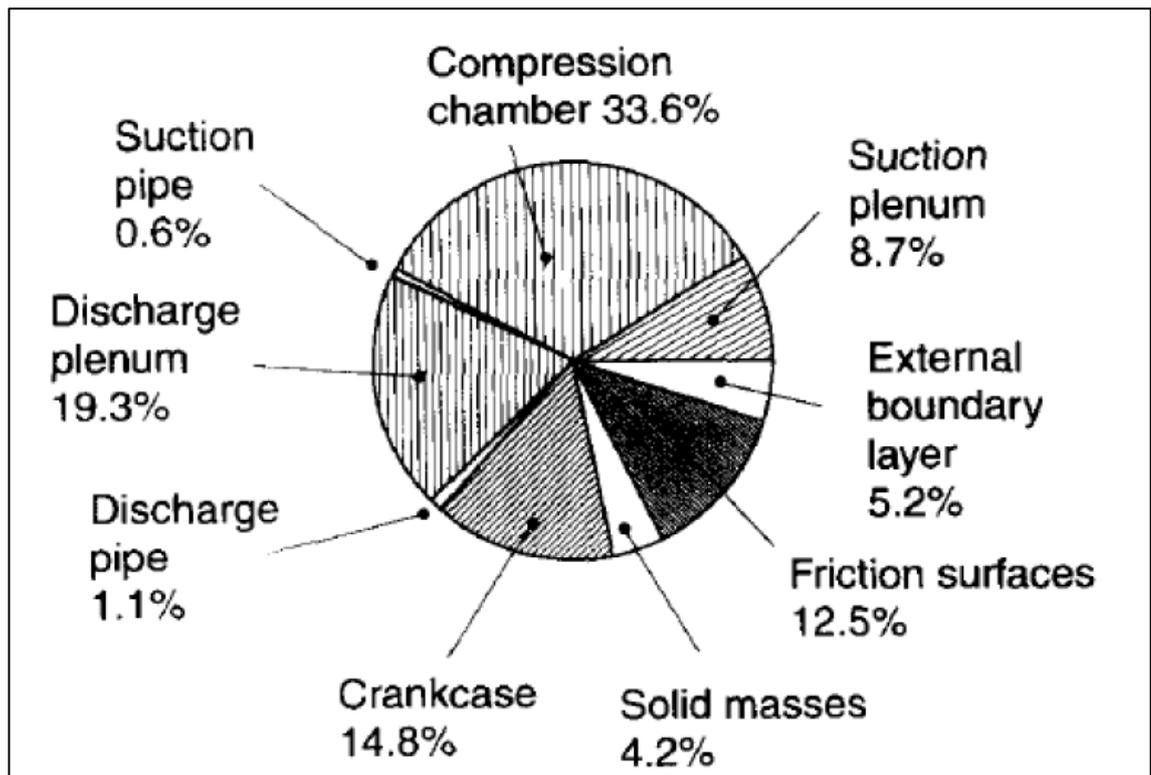


Figura I-12: Comparación de resultados de simulación y experimentales.

Fuente: McGovern y Harte, 1995.

### Conclusiones. –

Un método de desmenuzar y cuantificar los mecanismos de desperdicio de potencia al eje de un compresor se ha propuesto. Es indudable que propone una base sólida para la optimización en el diseño. Se permite cuantificar las pérdidas por transferencia de calor, toma un enfoque de condiciones inicial y final del fluido de compresión. Este sistema permite incorporarse en un análisis integral de un sistema integral

## **CAPITULO 1**

### **DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA**

En presente capítulo se muestra el esquema general del sistema en estudio y se determinan cuáles son los subsistemas que se analizarán para el flujo y estado estable del sistema. Así mismo, se toma como referencia para todas las ecuaciones y cálculos las condiciones estándar que se establecen como 25°C y 1 atm.

#### **1.1 Descripción del sistema de producción de GNC.**

##### **1.1.1 Descripción del Fluido a Procesar. –**

Las propiedades del Gas Natural son particulares dependiendo de cada yacimiento y están relacionadas con la composición del mismo. Para la presente tesis se ha considerado la siguiente composición del Gas Natural de Camisea. (Composición actual del Gas Natural suministrado a la red principal de distribución de Lima y Callao). Esta composición de Gas Natural se obtiene de la información oficial de composición de fluido publicada por el distribuidor de Gas Natural de Lima y Callao – Calidda. Para calcular las propiedades termodinámicas del fluido se utilizará el software Ariel 7 que es el software del sistema de compresión que determina las propiedades de los fluidos y su comportamiento luego de los respectivos procesos de compresión. A continuación se muestra la tabla de composición del Gas Natural a procesar.

Componente	Formula	% Molar ( $n_i$ )
Agua	H <sub>2</sub> O	0.0000
Metano	CH <sub>4</sub>	89.0000
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	8.9000
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.1300
Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.0002
Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.0002
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	1.200
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	0.2400

**Tabla 1.1.1-1:** Composición del Gas Natural  
Fuente: Calidda

Con la composición dada se ha calculado las propiedades que a continuación se detallan y que son parte de los cálculos de dimensionamiento de la red interna de Gas Natural y de los equipos de combustión y compresión del sistema. Para efectos de simplificación solamente en los cálculos de combustión, se considera como compuestos del gas natural solo a los que son mayores al 1% de composición molar, y redondeamos sus valores a enteros, bajo la premisa de que estas simplificaciones al ser del orden de los decimales y de ínfimo porcentaje molar no generan una variación significativa en los resultados. Por lo tanto, para efectos de cálculo consideramos, la siguiente composición. Metano: 90%, Etano, 9% Nitrógeno: 1%.

**Nota:** considérese Sm<sup>3</sup> como metro cúbico de Gas Natural a condiciones estándar, referidas al inicio del capítulo.

### 1.1.2 Descripción del Sistema Integral. –

El sistema es una unidad de compresión paquetizada con un compresor marca ARIEL Made in USA tipo horizontal, brazos opuestos, de 2 etapas doble, con una presión de succión de 27 A 50 barg, descarga a 250 barg al final de la segunda etapa de compresión, velocidad de 1800 RPM y un caudal de entrega de entre 2,500 Sm<sup>3</sup>/h y 5200 Sm<sup>3</sup>/h accionado por un motor a gas natural marca CUMMINS modelo KTA19 (GC: Gas Compression), post enfriado de tiro forzado con turbo alimentador y 420 HP de potencia nominal, aros lubricados, acoplamiento directo y tablero de comando electrónico como se muestra en la Figura 1.1.2-1:



**Figura 1.1.2-1:** Estación de Compresión de Gas Natural.  
**Fuente:** Internet.

El funcionamiento de la UCGN se describe de la siguiente manera:

1. Se enciende el equipo con un interruptor de seguridad.
2. Inicia el encendido de los ventiladores de extracción.
3. Ingresa el aire comprimido al sistema de arranque neumático del compresor para romper la inercia de giro y dar inicio a la secuencia de arranque.
4. Una vez encendido el motor el plc detecta una velocidad de giro constante del motor a 1200 rpm y envía la señal para la apertura de la válvula esférica a la entrada del compresor para que inicie el proceso de compresión aumentando la velocidad de giro del motor a 1800 rpm.
5. Se inicia el proceso de compresión elevando la presión de entrada del Gas Natural hasta 250 barg.
6. Se llenan los contenedores hasta la presión requerida.

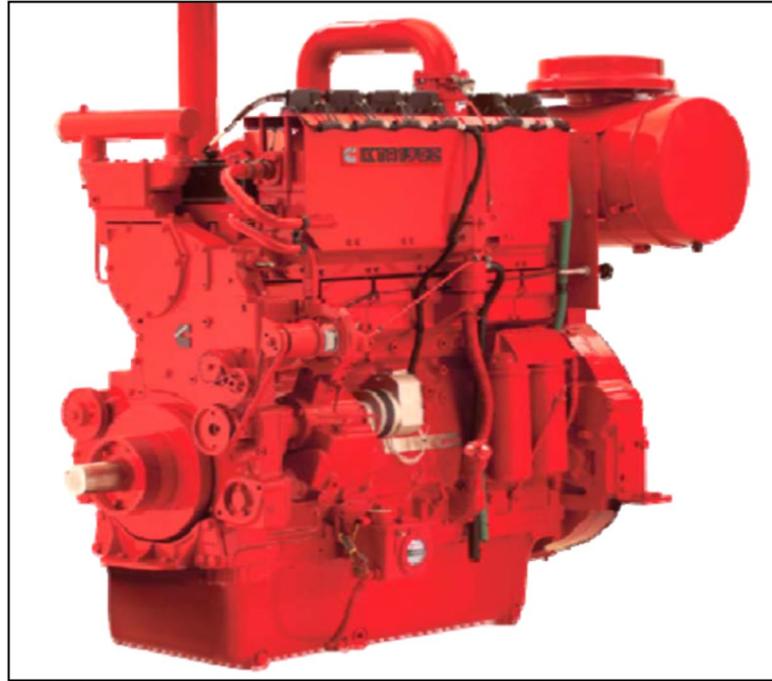
7. Se inicia la secuencia de parada con la reducción de la velocidad del giro del motor a 1,200 rpm y luego se baypasea el gas remanente para finalmente descargarlo a su tanque pulmón.
8. Se detiene el motor de combustión interna y finalmente los ventiladores succión de aire.

### **1.1.3 Descripción de Sub Sistemas principales y sus Volúmenes de Control. –**

La estación de compresión tiene subsistemas que permiten a través de la integración (paquetizado) darle al Gas Natural el valor agregado requerido para su transporte, comercialización y consumo. Estos elementos subsistemas son elementos principales que permiten entregar fuerza motriz, realizar trabajo de compresión, extraer energía en forma de calor y controlar el proceso de manera lógica y programada, como se describe a continuación.

#### **1.1.3.1 Motor de Combustión Interna (MCI). –**

Este motor de combustión interna es de la marca Cummins modelo KTA19GC y utiliza Gas Natural para su proceso de combustión. Así mismo, depende de un sistema de arranque neumático con suministro de aire a 150 psig de presión juntamente con un encendido por chispa. Funciona en dos puntos de velocidad de giro del motor que son 1,200 rpm (ralentí) y 1,800 rpm (máxima velocidad de giro). Dependiendo de los requerimientos de potencia del compresor, el motor de combustión aumentará el suministro de combustible y, por tanto, su potencia efectiva. Además, junto a las variaciones en las condiciones de carga, las temperaturas y presiones de los fluidos de trabajo del motor tenderán a fluctuar, exigiendo una regulación constante, dentro de un rango estrecho, de los diversos componentes que forman parte de los sistemas auxiliares del motor como son la admisión de combustible y de aire, la refrigeración, el escape, la lubricación y el eje de transmisión. Ver Figura 1.1.3.1-1



**Figura 1.1.3.1-1:** Motor de Combustión Interna a Gas Natural Marca Cummins Modelo KTA19 CG  
**Fuente:** Cummins Inc.

A continuación, se describen también los sistemas auxiliares del MCI.

- **Sistema de abastecimiento de combustible al Motor.**

El sistema de suministro de combustible del motor de combustión interna suministra gas natural a baja presión, a través de un carburador instalado en la línea de admisión de aire, entre el filtro y turbocompresor. Dos reguladores mecánicos limitan la máxima presión de suministro del carburante gaseoso.

- **Sistema de Admisión de Aire con Turbo alimentación al Motor.**

El sistema de admisión del motor Cummins KTA19GC cuenta con turbo sobrealimentación, aprovechando parte de la energía de los gases de escape para aumentar la densidad del aire suministrado al motor. La

sobrealimentación mejora el proceso de combustión de la mezcla del aire y gas natural, aumentando el rendimiento del motor. Sin embargo, el exceso de temperatura y presión del aire admitido puede provocar tensiones térmicas y mecánicas en componentes, aumentando también, el riesgo de ocurrencia de la detonación (combustión anormal).

- **Sistema de Escape del Motor.**

El sistema de escape del motor Cummins KTA19GC se restringe a dos componentes mecánicos: silencioso y tubo de escape. Dispone de tomas para la evaluación de las condiciones de flujo de los gases de escape entre la turbina y silencioso. Estos monitoreos de temperatura del escape permitirán analizar el comportamiento del proceso de combustión.

- **Sistema de Lubricación del Motor.**

El sistema de lubricación del motor Cummins KTA19GC está compuesto por el cárter, bomba de aceite, filtros de flujo total y radiador. Asimismo, el sistema cuenta con un manómetro para visualizar localmente la presión de aceite a la entrada de los filtros. La bomba transporta el aceite presurizado a través de los filtros y radiador, en dirección a todos los cojinetes y piezas deslizantes del motor. Las funciones del sistema de lubricación son: reducir la fricción y desgaste de los metales en movimiento, eliminar el calor generado, proteger los componentes contra la oxidación, corrosión y herrumbre, además de lavar y arrastrar contaminantes. Para atender estas exigencias, el aceite lubricante empleado en el motor está sometido a altas temperaturas y muy elevadas presiones.

- **Eje de transmisión del Motor.**

Este elemento conecta el pistón con el cigüeñal logrando la transmisión de

movimiento. Además, este elemento está acoplado al eje del compresor para poder transmitir la potencia necesaria para la compresión.

- **Instrumentación del Motor.**

El motor cuenta con elementos de medición y control que permiten determinar los parámetros de funcionamiento tales como consumo de combustible, presiones y temperaturas de aire y combustible a la entrada de cámara de combustión, temperaturas de entrada y salida de mezcla refrigerante en el radiador del motor, temperatura de gases de combustión y rpm del motor.

#### **1.1.3.2 Sistema de Enfriamiento del MCI (SEMCI). -**

El SEMCI está compuesto por una bomba principal, radiador principal, tanque de expansión, termostato, bomba secundaria y radiador secundario (para intercooler del aire de admisión). Además, cuenta con un sensor de temperatura para visualizar el estado del refrigerante que ingresa al motor. El enfriamiento de este fluido se hace mediante ventilación de tiro forzado en la parte superior del motor.

#### **1.1.3.3 Compresor de Gas Natural (CGN). –**

Este sub sistema, es un compresor recíprocante de Gas Natural marca Ariel modelo JGA/4 de 2 etapas dobles de compresión y cilindros opuestos y balanceados, ver Figura 3.3.2-1. Este compresor recibe el Gas Natural a una presión de succión regulada en su cilindro de primera etapa y luego de una primera etapa de compresión y post enfriado ingresa a la segunda etapa de compresión donde el gas llega a la presión requerida para nuevamente hacer un post enfriado y llevarlo a una temperatura con tendencia a la temperatura ambiente. Entre etapas de compresión cuenta con separadores que extraen partículas de aceite que podría transportar el gas comprimido al estar en contacto la lubricación del compresor. Este compresor,

se encuentra acoplado al motor de combustión interna y consta de las siguientes características técnicas, así como de sistemas auxiliares que también se describen a continuación:

- Numero de etapas: 2 doble.
- Presión máxima de aspiración: 50 bar.
- Presión mínima de aspiración: 20 bar.
- Potencia: 420 HP.
- Rendimiento máximo: 5200 Nm<sup>3</sup>/h.



**Figura 1.1.3.3-1:** Imagen Referencial del Compresor de Gas Natural.  
**Fuente:** Ariel Corporation.

- **Sistema de Ingreso de Gas Natural al Compresor.**

Este sistema de admisión consta de un tanque pulmón que provee el caudal necesario en el momento del arranque del compresor; luego de vencer la inercia del movimiento, se apertura una válvula esférica de admisión comandada por un actuador neumático que permite el ingreso del caudal de gas solicitado.

- **Sistema de lubricación del Compresor.**

El compresor cuenta con un sistema de lubricación movido por una bomba de aceite interior que utiliza una porción de la potencia suministrada al compresor.

- **Eje de Transmisión del Compresor.**

El eje de transmisión esta acoplado el eje del motor de combustión. Este eje transmite la potencia necesaria para mover los pistones de cada etapa del compresor y poder elevar la presión del Gas Natural a más de 200 barg.

- **Instrumentación del Compresor.**

En caso de que algunos parámetros límites del gas se encuentren con un valor fuera de los rangos de operación normal, los instrumentos MURPHY generaran una señal hacia el PLC, causando la detención del compresor y/o motor, así como el registro continuo (local o remoto) de todos los parámetros de funcionamiento del sistema de compresión.

#### **1.1.3.4 Sistema de Enfriamiento del CGN (SECGN). –**

Se compone de 4 intercambiadores de calor de iguales dimensiones y configuración en la parte superior de la UCGN el cual tiene tuberías con aletas circulares adheridas. Al interior de estos tubos circula el gas natural luego de cada etapa de compresión extrayendo el calor mediante ventilación de tiro forzado con unas hélices que extraen el aire circundante enfriando la superficie de aletas y tuberías mediante convección como se muestra graficamente a continuación:

## CAPITULO 2

### BASES TEORICAS

En el presente capítulo se describen las principales definiciones y conceptos teóricos aplicables a los sistemas en evaluación que determinarán cuáles son los parámetros de funcionamiento relevantes para los cálculos de balance de Masa, Energía, Exergía y Costos.

#### 2.1 Definiciones. –

**Sistema:** Un sistema es una colección identificable de materia cuyo comportamiento es el sujeto de estudio. Para la identificación, el sistema está rodeado por un límite del sistema, que puede ser puramente imaginario o puede coincidir con un límite real. El término sistema cerrado es a veces se usa para enfatizar que no hay flujo de materia en todo el sistema límite. El tipo de análisis termodinámico utilizado se conoce como análisis del sistema o control de análisis de masa [Kotas,1985].

**Alrededores:** Todo lo que se encuentra límite del sistema [Kotas,1985].

**Propiedad Termodinámica:** Característica medible de un sistema cuyo valor depende de la condición del sistema [Kotas,1985].

**Estado Termodinámico:** Es la condición del sistema la cual es descrita totalmente por sus propiedades observables [Kotas,1985].

**Estado de Equilibrio:** Es un estado del sistema en estudio en el cual no hay tendencia al cambio de ese estado [Kotas,1985].

**Proceso:** Acción que resulta en el cambio de estado de un sistema [Dincer y Rosen, 2013].

**Propiedad Extensiva:** Es aquella que depende de la cantidad de materia considerada y en la cual la suma de las partes hace el total. Por ejemplo: peso, masa y volumen.

**Propiedad Intensiva:** Es aquella que no depende de la cantidad de materia considerada. Por ejemplo: presión, volumen y propiedades específicas.

**Proceso Cuasi Estático:** Es el que se define como una idealización de un proceso real que se lleva a cabo de tal modo que el sistema está en todo momento muy cerca del estado de equilibrio

**Volumen de Control:** Es un espacio arbitrario que se instituye como objeto de estudio y cuya extensión está definida por la superficie de control.

**Trabajo:** Interacción entre dos sistemas tal que la sola interacción de un sistema sobre el otro se es equivalente a mover un peso.

**Calor:** Transferencia de energía entre dos sistemas en virtud de su diferencia de temperatura.

**Energía:** Capacidad de un sistema para producir trabajo, la cual, es una cantidad escalar que no puede ser observada directamente, pero que puede ser registrada y evaluada a través de mediciones indirectas. El valor total de la energía de un sistema es difícil de medir, mientras que el cambio de energía es relativamente fácil de evaluar [Dincer y Rosen, 2013].

**Entropía:** Magnitud termodinámica que indica el grado de desorden molecular de un sistema.

**Proceso Reversible:** Proceso mediante el cual un sistema y sus alrededores pueden retornar a su estado inicial sin efectos observables.

**Proceso Irreversible:** Proceso mediante el cual un sistema y sus alrededores, no pueden retornar a su estado inicial a través de subsecuentes procesos reversibles [Dincer y Rosen, 2013].

**Exergía:** Es una propiedad termodinámica que permite determinar el potencial de trabajo útil de una determinada cantidad de energía que se puede alcanzar por la interacción espontánea entre un sistema y su entorno.

**Convención de Signos:** En esta presente tesis la convención de signos sigue los estándares internacionales en los que el ingreso de calor al sistema es positivo y la salida de calor del sistema es negativo, adicionalmente para el trabajo, se considera positivo si este es realizado por el sistema y negativo si es realizado sobre el sistema [Kotas, 1985].

## 2.2 Ley de Conservación de la Masa [Moran, 2014]. –

Según el enunciado de la conservación de la masa, esta no se crea ni se destruye, solo se transforma. Por lo tanto, para un volumen de control se tiene lo siguiente:



**Figura 2.2-1:** Volumen de Control de Balance de Masa.

**Fuente:** Elaboración Propia.

En términos generales, se puede enunciar la conservación de masa para diferentes masas ingresando y saliendo del Volumen de Control, se puede enunciar lo siguiente:

“La tasa de cambio de una masa en un volumen de control en un tiempo t es igual a la tasa de cambio de un flujo de masa que ingresa en un tiempo t menos la tasa de cambio de un flujo de masa que sale en un tiempo t”

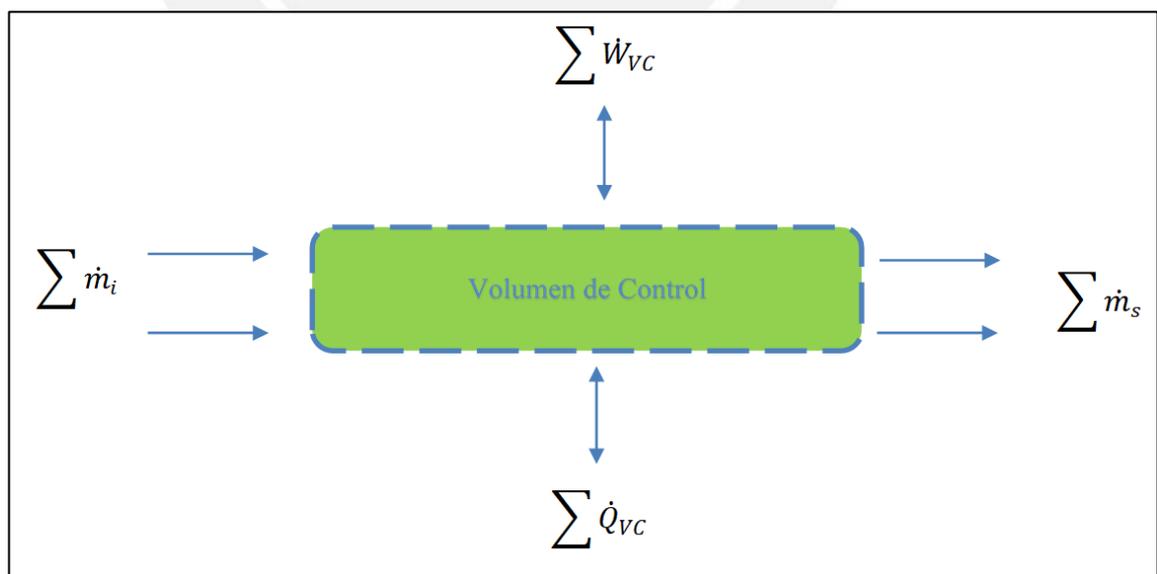
$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \sum_{VC} m_i - \sum_{VC} m_s$$

Ecuación 2.2-1

Siendo  $dm_{VC}$  el valor de diferencial de masa del Volumen de Control,  $dt$  el diferencial de tiempo,  $\sum_{VC} m_i$  la sumatoria de masas que ingresan al Volumen de Control y  $\sum_{VC} m_s$  la sumatoria de masas que salen del Volumen de Control.

### 2.3 Primera Ley de la Termodinámica (PLT) [Dincer y Rosen, 2013 / Kotas,1985]. –

La Primera Ley de la Termodinámica establece que la energía no se crea ni se destruye solo se transforma. Esta es la ley de conservación de la energía. A continuación, el análisis de un volumen de control y su ecuación general aplicando esta ley. Sea el Volumen de control siguiente, ver Figura 2.3-1:



**Figura 2.3-1:** Volumen de Control general.

**Fuente:** Elaboración Propia

Así mismo la ecuación general para este Volumen de Control es:

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \sum_{VC} \dot{Q}_{VC} - \sum_{VC} W_{VC} + \sum_{VC} \dot{m}_i \left[ h_i + \frac{1}{2} Vel_i^2 + gZ_i \right] - \sum_{VC} \dot{m}_s \left[ h_s + \frac{1}{2} Vel_s^2 + gZ_s \right]$$

Ecuación 2.3-1

Siendo  $\frac{dE_{VC}}{dt}$  la variación de energía en función del tiempo,  $\sum_{VC} \dot{Q}_{VC}$  la sumatoria de calores que atraviesan la superficie,  $\sum_{VC} W_{VC}$  el total del trabajo sobre la superficie,  $h_i$  las entalpías que ingresan al sistema,  $Vel_i$  la velocidad de la corriente que ingresa,  $g$  la aceleración de gravedad y  $Z_i$  la altura de la corriente, todos estos términos referenciados al Volumen de Control.

#### 2.4 Segunda Ley de la Termodinámica (SLT) [Kotas, 1985]. –

La segunda Ley de la termodinámica generalmente se expresa como una desigualdad, indicando que la entropía total después de un proceso es igual o mayor que la de antes. La igualdad solo se cumple para procesos ideales o reversibles.

$$\dot{\Pi} = \frac{dS_{VC}}{dt} + \sum_{VC} (s_s \dot{m}_s) - \sum_{VC} (s_i \dot{m}_i) - \sum_{VC} \frac{\dot{Q}_{VC}}{T_{VC}} \geq 0$$

Ecuación 2.4 -1

Siendo,  $\dot{\Pi}$  el valor de entropía generada,  $\frac{dS_{VC}}{dt}$  la variación de entropía del sistema,  $s_s$  la entropía de las corrientes que salen del sistema,  $\dot{m}_s$  la masa de salida del sistema,  $s_i$  la entropía de las corrientes que salen del sistema  $\dot{m}_i$  la masa de la corriente que ingresa al sistema,  $\dot{Q}_{VC}$  el calor que atraviesa la superficie del sistema y  $T_{VC}$  la temperatura de la región por donde existe el flujo de calor en el Volumen de Control.

## 2.5 Exergía [De Oliveira, 2013]. –

El Análisis Exergético es una técnica de análisis termodinámico basado en la SLT, que proporciona una alternativa y medios iluminantes para evaluar y comparar procesos y sistemas de manera racional y significativa. Este concepto aplicado para su caso más general se define de la siguiente manera:

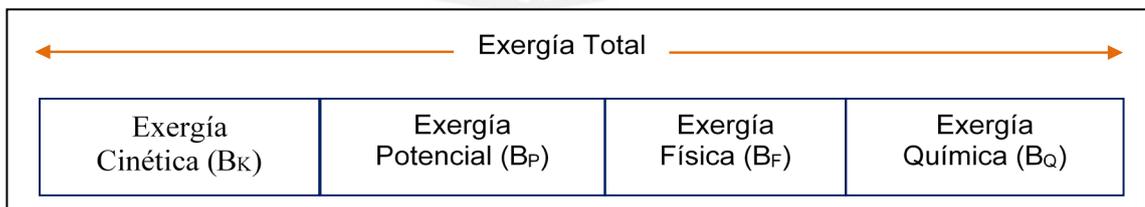
$$\frac{d\dot{X}}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{VC} + \sum_i \dot{m}_i (h_i - T_o s_i) - \sum_s \dot{m}_s (h_s - T_o s_s) - T_o \dot{S}_{ger}$$

Ecuación 2.5-1

Siendo  $\frac{d\dot{X}}{dt}$  la variación de Exergía del sistema,  $T_o$  la temperatura ambiente,  $T_j$  la temperatura de la región por la cual sale el flujo de calor,  $\dot{Q}_j$  el flujo de Calor que sale por el sistema,  $\dot{W}_{VC}$  el trabajo resultante,  $\dot{m}_i, h_i, T_o, s_i$  las masas, entalpías, temperatura ambiente y entropía de ingreso y  $\dot{m}_s, h_s, s_s$  las masas, entalpías y entropía de salida.

### 2.5.1 Componentes Exergéticos [De Oliveira, 2013]. –

Dejando de lado algunas consideraciones la Exergía se puede dividir en cuatro componentes: Exergía Cinética, Exergía Potencial, Exergía Física y Exergía Química.



**Figura 2.5.1-1:** Componentes Exergéticos.  
Fuente: Elaboración Propia.

Siendo la expresión de Exergía Total la siguiente:

$$\dot{X}_{Total} = \dot{X}_K + \dot{X}_P + \dot{X}_F + \dot{X}_Q$$

Ecuación 2.5.1-1

Que indica que la Exergía total del Sistema es igual a la suma de la exergía Cinética, Potencial, Física y Química de las corrientes en análisis.

Se debe tener en cuenta las siguientes igualdades exergéticas  $\dot{X}_K = \dot{X}_K$  y  $\dot{X}_P = \dot{X}_P$  porque su transformación es 100% en trabajo disponible, consecuentemente:

$$\dot{X}_K = \dot{m} \frac{Vel^2}{2}$$

Ecuación 2.5.1-2

Siendo  $\dot{X}_K$  la exergía cinética,  $\dot{m}$  el flujo de masa y  $Vel$  la velocidad.

Así mismo,

$$\dot{X}_P = \dot{m}gZ$$

Ecuación 2.5.1-3

Siendo  $\dot{X}_P$  la exergía potencial,  $\dot{m}$  el flujo de masa y  $Z$  la altura.

Por otro lado, para un sistema dado la Exergía Física es equivalente al trabajo que puede ser desempeñado cuando un sistema o tasa de flujo se mueve de un estado termodinámico dado a un estado de referencia que se encuentre en equilibrio térmico y mecánico con el medio ambiente. Para este sistema la Exergía Física viene dada por:

$$\dot{X}_F^s = \dot{m}[u - u_o + P_o(v - v_o) - T_o - (s - s_o)]$$

Ecuación 2.5.1-4

Siendo  $\dot{X}_F^s$ ,  $\dot{m}$ ,  $u$ ,  $u_o$ ,  $P_o$ ,  $v$ ,  $v_o$ ,  $T_o$ ,  $s$ ,  $s_o$  la exergía física, el flujo de masa, la energía interna, la energía interna de estado de referencia, la presión de referencia, el volumen específico, el volumen específico de referencia, la temperatura de referencia, la entropía y la entropía en el estado de referencia.

Para un flujo de masa:

$$\dot{X}_F^S = \dot{m}[h - h_o - T_o(s - s_o)]$$

Ecuación 1.2.1.5-5

Siendo  $\dot{X}_F^S$ ,  $\dot{m}$ ,  $h$ ,  $h_o$ ,  $T_o$ ,  $s$ ,  $s_o$  la exergía física, el flujo de masa, la entalpía, la entalpía de estado de referencia, la temperatura de referencia, la entropía y la entropía en el estado de referencia.

Para un gas perfecto con  $C_p = \text{Cte}$  se tiene que la Exergía Física es:

$$\dot{X}_F^S = \dot{m}[C_p \left[ (T - T_o) - T_o \ln \left( \frac{T}{T_o} \right) \right] + R T_o \ln \left( \frac{P}{P_o} \right)]$$

Ecuación 2.5.1-6

Siendo  $\dot{X}_F^S$ ,  $\dot{m}$ ,  $C_p$ ,  $T$ ,  $T_o$ ,  $P$ ,  $P_o$  la exergía física, el flujo de masa, el calor específico a presión constante, la entalpía de estado de referencia, la temperatura de referencia, la presión y la presión en el estado de referencia.

Para sólidos y líquidos de comportamiento asumido como incomprensible y que tienen un calor específico asumido constante y un volumen específico promedio  $V_m$  entre  $P$  y  $P_o$ .

$$\dot{X}_F^S = \dot{m} \left[ C \left[ (T - T_o) - T_o \ln \left( \frac{T}{T_o} \right) \right] + v_m (P - P_o) \right]$$

Ecuación 2.5.1-7

Siendo  $\dot{X}_F^S$ ,  $\dot{m}$ ,  $C_p$ ,  $T$ ,  $T_o$ ,  $v_m$ ,  $P$ ,  $P_o$  la exergía física, el flujo de masa, el calor específico a presión constante, la entalpía de estado de referencia, la temperatura de referencia, la presión y la presión en el estado de referencia.

El concepto de Exergía Química significa el máximo trabajo posible a ser desempeñado cuando dado sistema es tomado de la referencia restringida y llevado al estado de equilibrio mecánico, térmico y químico.

$$\dot{X}_Q^S = U_o + P_o V_o - T_o S_o - \sum_{i=1}^n \mu_{o,i} N_i = \sum_{i=1}^n (\mu_{i,o} - \mu_{o,i}) N_i$$

Ecuación 2.5.1-8

Siendo  $\dot{X}_Q^S$ ,  $U_o, P_o, T_o, S_o$ ,  $T$ ,  $\mu_{o,i}$ ,  $N_i$  la exergía química, la energía interna, la Presión de referencia, el volumen en el estado de referencia, la temperatura de referencia, la entropía del estado de referencia y el numero de moles del fluido.

Así mismo para un flujo de masa:

$$\bar{X}_Q^S = \bar{h}_o - T_o \bar{S}_o - \sum_{i=1}^n \mu_{o,i} x_i$$

Ecuación 2.5.1-9

Siendo  $\dot{X}_Q^S$ ,  $h_o, T_o, S_o$ ,  $\mu_{o,i}$ ,  $x_i$  la exergía química, la energía interna, la Presión de referencia, el volumen en el estado de referencia, la temperatura de referencia, la entropía del estado de referencia y la fracción molar del fluido.

Con las expresiones Exergía física y Química se tiene:

$$\dot{X}^S = U + P_o V - T_o S - \sum_{i=1}^n u_{o,i} N_i$$

Ecuación 2.5.1-10

Siendo  $\dot{X}^S$ ,  $U, P_o, V, T_o, S$ ,  $\mu_{o,i}$ ,  $N_i$  la exergía, la energía interna, la Presión de referencia, el volumen, la temperatura de referencia, la entropía y el numero de moles del fluido.

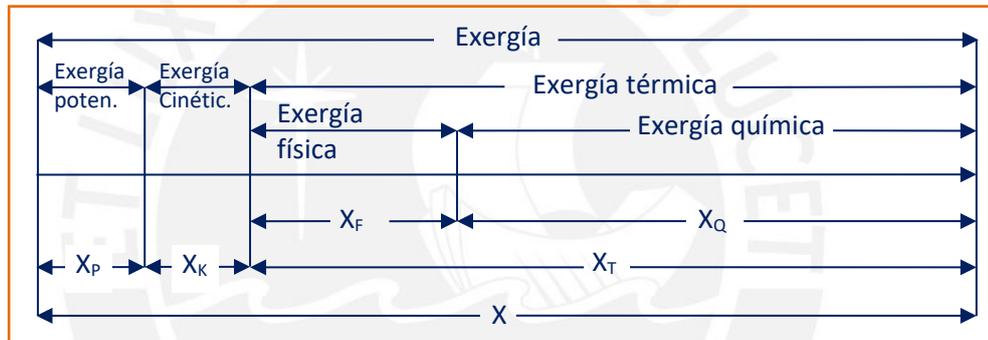
Así mismo para un flujo de masa:

$$\bar{X}^S = \bar{H} - T_o \bar{S} - \sum_{i=1}^n \mu_{o,i} x_i$$

Ecuación 2.5.1-11

Siendo  $\bar{X}^S$ ,  $\bar{H}$ ,  $T_o$ ,  $\bar{S}$ ,  $\mu_{o,i}$ ,  $x_i$  la exergía, la entalpía, la temperatura de referencia, la entropía y el numero de moles del fluido.

En conclusión, el esquema general de componentes exergéticos se muestra como la suma de componentes exergéticos parciales.



**Figura 2.5.1-2:** Esquema general de componentes exergéticos.

**Fuente:** De Oliveira, 2013.

La Energía química que se obtiene de un modelo de referencia estándar propuesto por Szargut en 1988, que está compuesto por los siguientes elementos:

O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, D<sub>2</sub>O, Ar, He, Ne, Kr, Xe

La Exergía química de uno de estos gases de referencia, está dado por:

$$X_Q = R T_o \ln \left( \frac{P_o}{P_{oo}} \right)$$

Ecuación 2.5.1-12

Donde,  $X_Q$ ,  $R$ ,  $T_o$ ,  $P_o$ ,  $P_{oo}$  son la exergía química, constante universal de los gases,

Temperatura de referencia, presión de Referencia.

Para sustancias puras que no existen en este ambiente de referencia se tiene:

$$X_Q = \Delta G_O - \left[ \sum_i x_i X_{Q,i} \right]_{\text{correactantes}} + \left[ \sum_j x_j X_{Q,j} \right]_{\text{productos}}$$

Ecuación 2.5.1-13

Siendo,  $X_Q$  la exergía química,  $\Delta G_O$  la energía libre de Gibbs,  $x_i$  la fracción molar y  $X_{Q,i}$  la exergía individual de cada componente.

Así mismo,

$$\Delta G_O = \sum_j \nu_j S_i - \sum_k \nu_k S_k$$

Ecuación 2.5.1-14

Siendo  $\Delta G_O$  la energía libre de Gibbs,  $\nu_i$  la fracción molar y  $S_{i,k}$  las entropías.

Para una mezcla se tiene:

$$X_{Q,mixt.} = \sum_i x_i X_{Q,i} + RT_o \sum_i x_i \ln \gamma_i x_i$$

Ecuación 2.5.1-15

Siendo,  $X_{Q,mixt.}$  la exergía de la mezcla,  $x_i$  la fracción molar,  $X_{Q,i}$  la exergía del componente,  $R$ , la constante universal de los gases  $T_o$  la temperatura de referencia.

La Exergía química de algunos combustibles se puede calcular en función del poder calorífico inferior (LHV), en el caso de Gas Natural  $\phi = 1.4$  y para el Petróleo  $\phi = 1.08$ , [De Oliveira, 2013].

$$X_Q = \phi LHV$$

Ecuación 2.5.1-16

Siendo,  $X_Q$  la exergía química,  $\emptyset$  la constante de exergía y LHV el poder calorífico inferior.

### 2.5.2 Eficiencia. –

Para un proceso o equipo dado se define eficiencia como:

$$\eta = \frac{\sum(\text{valor de los productos})}{\sum(\text{valor de las entradas})}$$

Ecuación 2.5.2-1

Siendo el numerador, el valor de los productos y el denominador la sumatoria del valor de las entradas.

### 2.5.3 Eficiencia Exergética

La eficiencia exergética es comúnmente usado y aplicada para analizar el desempeño de procesos químicos, máquinas térmicas y procesos dispositivos. Para esto definimos 3 expresiones.

- 1) Para evaluación de procesos químicos:

$$\eta_P = \frac{\text{Exergía de Productos Útiles}}{\text{Exergía de Suministrada al Sistema}}$$

Ecuación 2.5.3-1

- 2) Para el análisis de procesos térmicos:

$$\eta_{X_1} = \frac{\text{Efecto de Exergía Útil}}{\text{Exergía de Conducción}}$$

Ecuación 2.5.3-2

Para el análisis de máquinas térmicas y sistemas de refrigeración que interactúan con el medio ambiente se tiene:

$$\eta_{X_2} = \frac{\eta_e}{\eta_{carnot}} = \frac{\eta_e}{\eta_{max}}$$

Ecuación 2.5.3-3

Siendo  $\eta_e$  la eficiencia energética y  $\eta_{carnot}$  la eficiencia de Carnot.

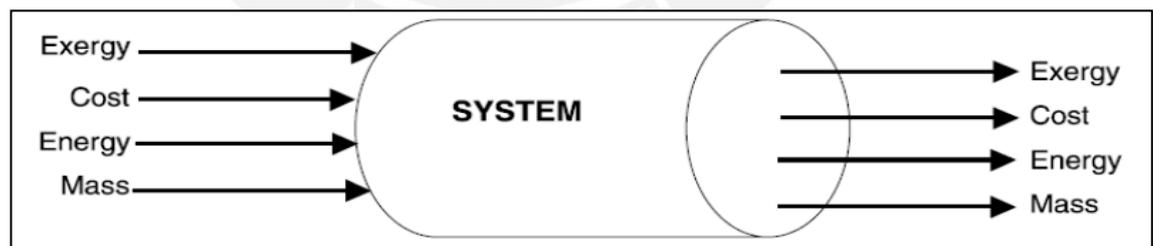
3) Finalmente, para cuantificar el desempeño de equipos y procesos donde el único efecto es la destrucción de exergía los cuales también se llaman procesos disipativos.

$$\eta_{b2} = \frac{\sum(\text{exergía de salida})}{\sum(\text{exergía de entrada})}$$

Ecuación 2.5.3-4

## 2.6 Metodología EXCEM

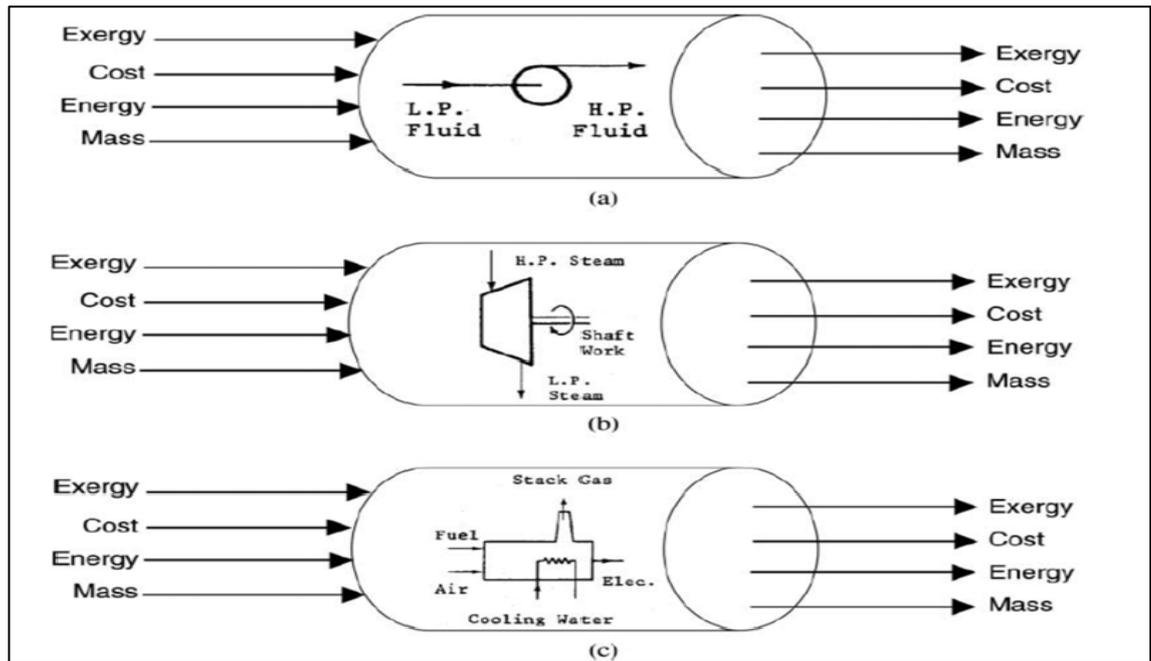
Rosen y Dincer (2002), proponen una metodología de análisis para sistemas y procesos basada en valores de Exergía, Costo, Energía y Masa (EXCEM) como se explica en todo este punto 2.6.



**Figura 2.6-1:** Metodología de Análisis EXEM.

**Fuente:** Rosen y Dincer, 2002.

Esta metodología requiere de la examinación de los flujos de cada una de las cantidades representadas por EXCEM mediante sus balances respectivos. A continuación, se muestran algunas aplicaciones del análisis EXCEM para algunos equipos industriales.



**Figura 2.6-2:** Aplicación del análisis EXCEM a equipos diversos. a) Bomba; b) Turbina a Vapor; c) Estación de Generación Eléctrica a Carbón.

**Fuente:** Rosen y Dincer, 2002.

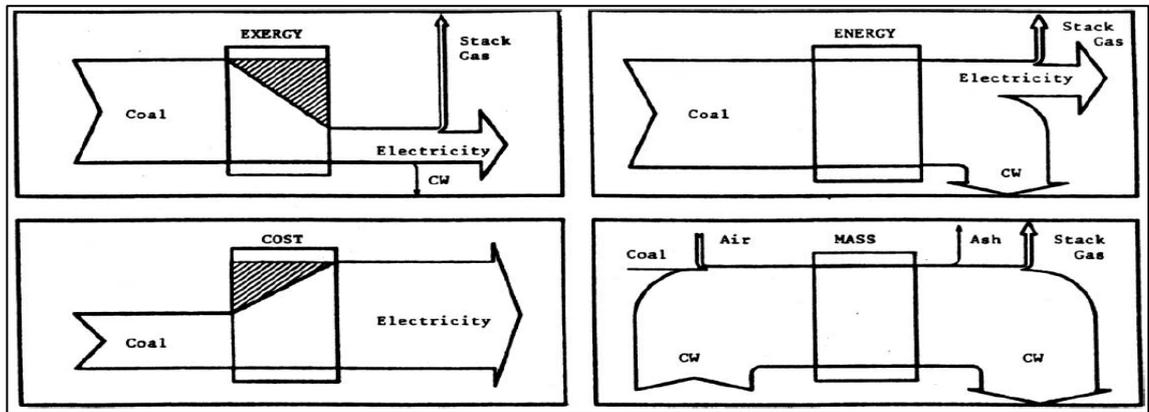
Analizando cada elemento se tiene lo siguiente:

**Bomba:** La aplicación del análisis EXCEM a una bomba (Fig. 2.6-2-a) es relativamente sencilla. Un fluido y electricidad ingresan y el fluido a mayor presión y calor (a menos que la bomba sea adiabática) es la salida. Si la bomba es adiabática, se asignan todos los costos asociados con los insumos y la generación a la salida. Si la bomba no es adiabática, todos los costos de entrada y generación siguen siendo lógicamente asignado a la corriente de fluido de salida porque la pérdida de calor es un desperdicio.

**Turbina de vapor:** La aplicación del análisis EXCEM a una turbina de vapor (figura 2.6-2-b) requiere más reflexión porque una decisión subjetiva debe hacerse con respecto a la asignación de costos. El trabajo del eje, las salidas de vapor de baja entalpía y calor pueden asignarse como parte de los costos de entrada y generación. Los las asignaciones dependen de los usos para las salidas. El vapor de baja entalpía, por ejemplo, puede o puede no ser un desperdicio

**Estación generadora eléctrica de carbón:** En el caso particular de la Estación de

Generación de Electricidad a Carbón a diferencia de los otros (a y b) se debe visualizar como análisis EXCEM individuales que componen el sistema total. A continuación, se muestra un resumen gráfico de cada uno de los balances individuales de las variables EXCEM.



**Figura 2.6-3:** Resumen de resultados del análisis EXCEM de cada variable individual para la estación de Generación Eléctrica a Carbón.

**Fuente:** Rosen y Dincer, 2002.

De lo anterior mostrado se puede verificar que el análisis EXCEM contribuye contundentemente con el diseño, mejoramiento y optimización de procesos y formulación de elementos de decisión energéticos, económicos y ambientales. Al ser la UCGN un elemento con varios procesos se debe considerar el análisis en detalle como se explica en esta metodología.

## 2.7 Termoeconomía. –

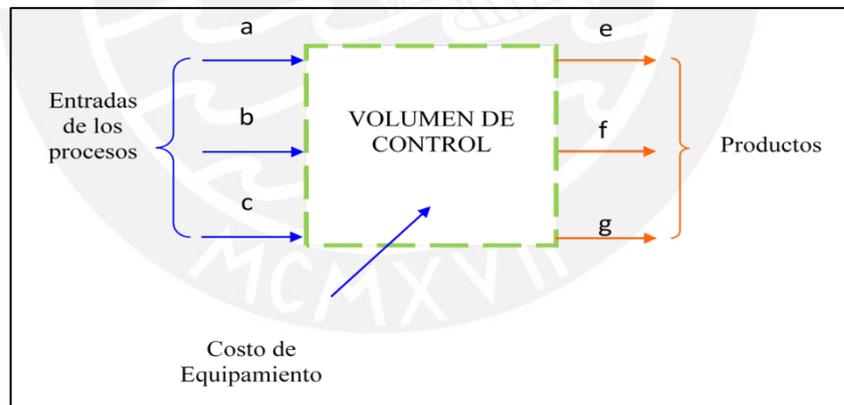
G. Tsatsaronis [2002] explica este concepto en su publicación de la siguiente manera: “La Termoeconomía, como método de reducción de costos con ayuda de la Exergía, proporciona información importante para el diseño de plantas de conversión de energía rentables.” Así mismo, afirma que el principio del costo de Exergía se utiliza para asignar valores monetarios a todo el material y las corrientes de energía dentro de una planta, así como a la destrucción de Exergía dentro cada componente de la planta. Por otro lado, explica que la evaluación y optimización del diseño se basa en compensaciones entre la destrucción exergética (eficiencia exergética) y el costo de la

inversión para los componentes más importantes de la planta. De esto concluye que en el diseño de la conversión de energía, la planta se puede mejorar usando una técnica Exergoeconómica de optimización iterativa o enfoques de optimización matemática. Sin, embargo no solo aplica para el diseño sino también proporciona información sobre el proceso de formación de costos, interacciones entre la termodinámica y la economía y las interacciones entre componentes de la planta. Esta información es muy valiosa para plantas de conversión de energía ya que permite determinar la relación existente entre sus eficiencias exergéticas y sus costos de producción así como mejorar su diseño y operación.

Silvio de Oliveira Jr. [2013] lo siguiente: sea un Volumen de control como el mostrado en la figura 2.7-1 se tiene que para un equipo o componente en Estado Estable:

$$\sum (\text{tasa de gastos}) = \sum (\text{tasa de costo de los productos})$$

Ecuación 2.7-1



**Figura 2.7-1:** Volumen de Control de balance de Costos.

**Fuente:** De Oliveira, 2013.

Para el sistema el balance de costo es:

$$C_a + C_b + C_c + C_{\text{equipamiento}} = C_e + C_f + C_g$$

Ecuación 2.7-2

Siendo,  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_c$ ,  $C_{equipamiento}$ ,  $C_e$ ,  $C_f$ ,  $C_g$  el costo del componente a, b, c, equipamiento, e, f y g respectivamente (Silvio de Oliveira Jr. [2013]):

Haciendo los costos del sistema específicos se tiene:

$$c_i = \frac{C_i}{N_i}$$

Ecuación 2.7-3

El  $N_i$  puede ser una cantidad como la tasa de flujo másico, la tasa de flujo volumétrico, tasa de energía / tasa de flujo de energía, tasa de Exergía / tasa de flujo de Exergía

Reemplazando lo anterior en la ecuación del sistema, se tiene:

$$cN_a + c_bN_b + c_cN_c + C_{equipamiento} = c_eN_e + c_fN_f + c_gN_g$$

Ecuación 2.7-4

Cuando hay más de un producto, los valores de  $c_e$ ,  $c_f$  y  $c_g$  no puede determinarse solo por la ecuación del balance de costos, siendo necesario ecuaciones adicionales basadas en un criterio de partición de costos:

- Los productos son para uso exclusivo de la planta analizada.
- Los productos se venderán en el mercado.
- Un producto es considerado un producto primario del proceso.
- Un producto es considerado ser un subproducto del proceso, etc.

Cuando hay un solo producto en el proceso el balance de costos determina el valor del costo unitario promedio.

$$c_i = \frac{\text{Costo de Producción Total}}{N_i \text{ unidades de producto}}$$

Ecuación 2.7-5

## CAPITULO 3

### APLICACIÓN DEL METODO EXCEM AL SISTEMA

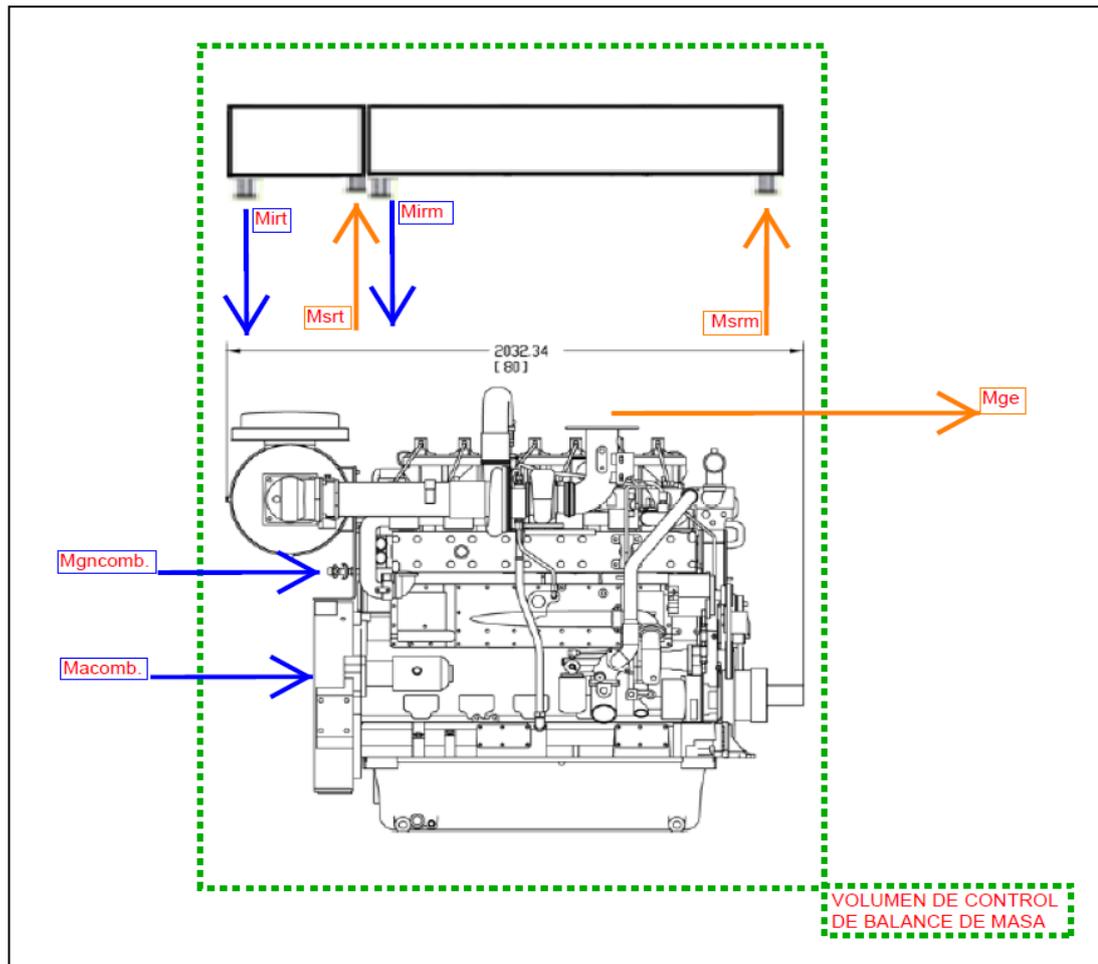
En el presente capítulo se aplicará el método EXCEM para los cálculos de balance de Masa, Energía, Exergía y Costos de la UCGN utilizando los conceptos teóricos descritos en el capítulo anterior a los subsistemas principales descritos en el primer capítulo.

#### 3.1 Balance de Masa

El balance de masa para el para los subsistemas consiste en aplicar la ley de conservación de la masa teniendo en cuenta que la UCGN funciona en régimen estable.

##### 3.1.1 Balance de masa al Motor de Combustión Interna (MCI). –

De la figura 3.1.1-1 aplicando el principio de conservación de la masa, ya que no hay acumulación de esta por ser un flujo y estado estable y teniendo en cuenta que para efectos de esta tesis no se considerará los consumos de aceite lubricante para el análisis, concluimos lo siguiente:



**Figura 3.1.1-1:** Volumen de Control de Balance de Masa del Motor de Combustión Interna a Gas Natural Marca Cummins Modelo KTA19 CG  
**Fuente:** Elaboración Propia.

$$\dot{M}_{acomb.} + \dot{M}_{gncomb.} = \dot{M}_{ge}$$

Ecuación 3.1.1-1

Donde  $\dot{M}_{acomb.}$ ,  $\dot{M}_{gncomb.}$  y  $\dot{M}_{ge}$  son la masa de ingreso del aire combustible, la masa de ingreso del gas natural combustible y la masa de salida de los gases de escape respectivamente. El balance de masa de la mezcla aire combustible se basa como fuente en el ingreso de aire y gas natural como combustible que luego de la ignición en la cámara de combustión del motor se convierten en gases de escape del motor. Así mismo,

$$\dot{M}_{irt} = \dot{M}_{srt} = \dot{M}_{rt}$$

Ecuación 3.1.1-2

Para efectos de simplificación hacemos el valor de ingreso y salida de masa de refrigerante igual a  $\dot{M}_{rt}$ .

Luego,

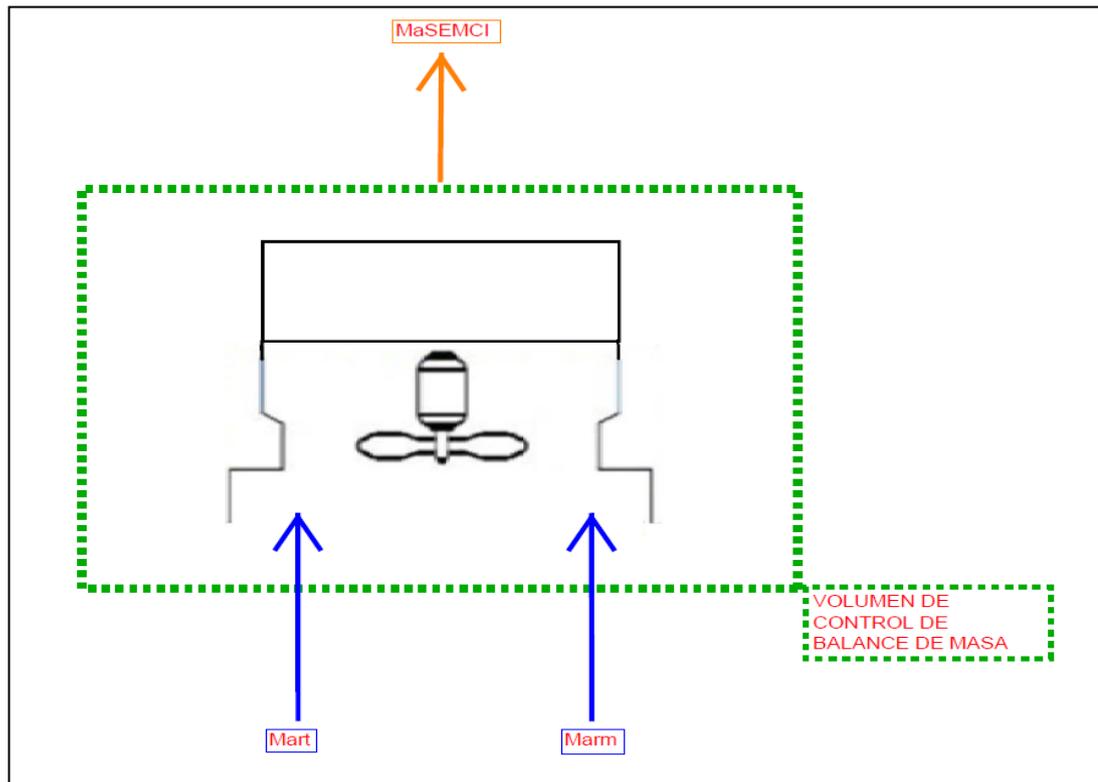
$$\dot{M}_{irm} = \dot{M}_{srm} = \dot{M}_{rm}$$

Ecuación 3.1.1-3

Para efectos de simplificación hacemos el valor de ingreso y salida de masa refrigerante, igual a  $\dot{M}_{rm}$ .

### 3.1.2 Balance de Masa para el Sistema de Enfriamiento del MCI (SEMCI). –

De la Figura 3.1.2-1 observamos los flujos de masa que ingresan y salen del SEMCI, luego, aplicando el principio de conservación de la masa descrita en el capítulo anterior, ya que no hay acumulación, concluimos lo siguiente:



**Figura: 3.1.2-1** Volumen de Control de Balance de Masa del SEMCI.

**Fuente:** Elaboración Propia.

$$\dot{M}_{art} + \dot{M}_{arm} = \dot{M}_{aSEMCI}$$

Ecuación 3.1.2-1

### 3.1.3 Balance de Masa para el Compresor de Gas Natural (CGN). –

De la Figura 3.1.3-1 observamos los flujos de masa que ingresan y salen del CGN, luego, aplicando el principio de conservación de la masa descrita en el capítulo anterior, ya que no hay acumulación, concluimos lo siguiente para el compresor:

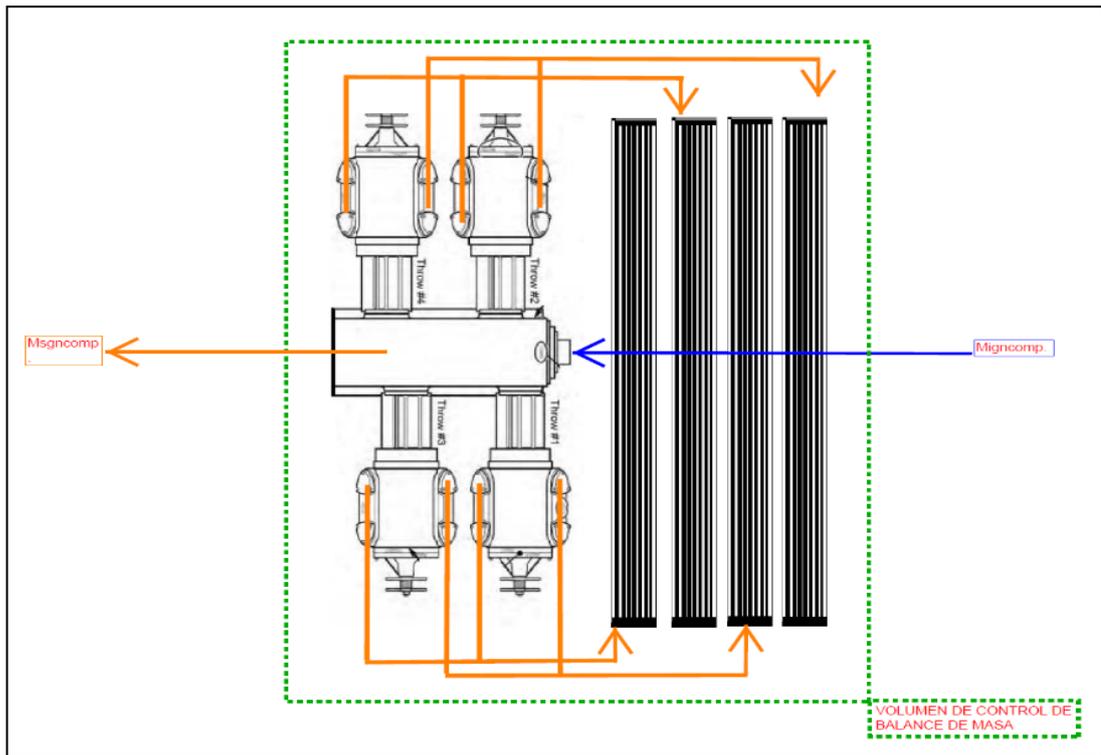


Figura 3.1.3-1: Imagen Referencial del Compresor de Gas Natural.

Fuente: Elaboración Propia.

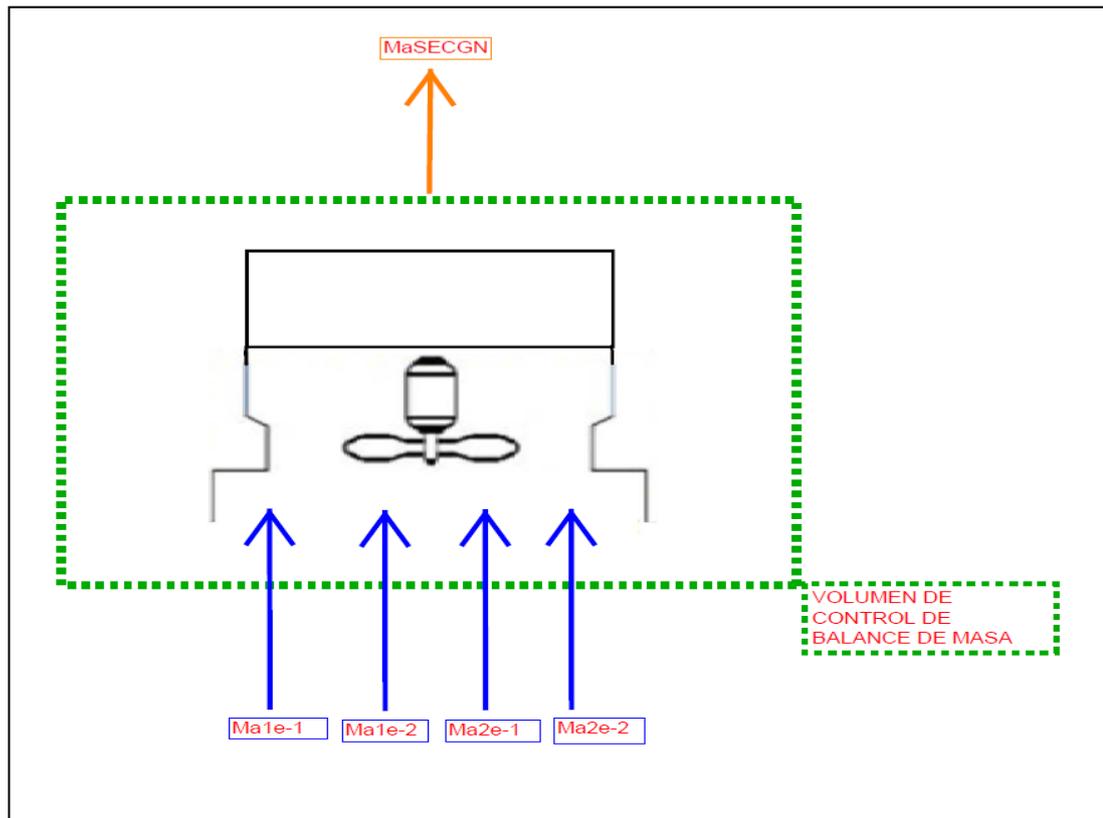
$$\dot{M}_{igncomp.} = \dot{M}_{sgncomp.} = \dot{M}_{gncomp.}$$

Ecuación 3.1.3-1

Para efectos de simplificación hacemos el valor de ingreso y salida de masa de gas natural de compresión igual a  $\dot{M}_{gncomp.}$

### 3.1.4 Balance de Masa para el Sistema de Enfriamiento del CGN (SECGN). –

De la figura 3.1.4-1 observamos los flujos de masa que ingresan y salen del SEMCI, aplicando el principio de conservación de la masa descrita en el capítulo anterior concluimos lo siguiente:



**Figura 3.1.4-1:** Volumen de Control de Balance de Masa del SECGN.

**Fuente:** Elaboración Propia.

$$\dot{M}_{a1e-1} + \dot{M}_{a1e-2} + \dot{M}_{a2e-1} + \dot{M}_{a2e-2} = \dot{M}_{aSECGN}.$$

Ecuación 3.1.4-1

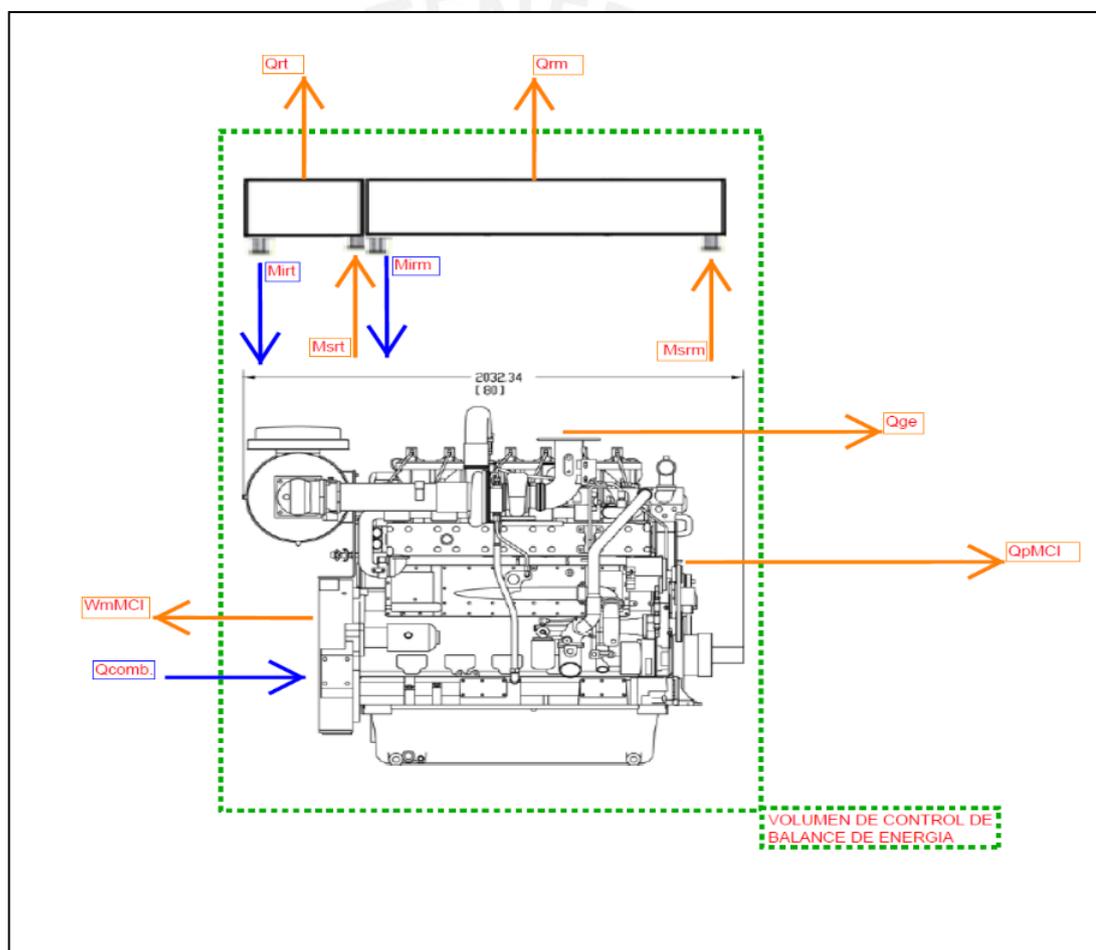
Se debe tener en cuenta que este es un compresor de dos etapas doble que procesa la mitad del Gas Natural en una primera y segunda etapa independientes y la otra mitad en una primera y segunda etapa independiente adicional pero que luego del enfriamiento de segunda etapa ambas se juntan en un manifold de distribución para sumar un único caudal. Luego para el balance de masa de cada radiador bastará con dividir el flujo de aire total de este ventilador entre 4 ya que son 4 radiadores de Gas Natural idénticos.

### 3.2 Balance de Energía. –

Para determinar el balance energético al sistema debemos aplicar la Primera Ley de la Termodinámica al Volumen de Control de Balance de Energía de cada subsistema.

#### 3.2.1 Balance de Energía al MCI. –

Los flujos de energía del MCI se muestran en la figura 3.2.1-1 a continuación:



**Figura 3.2.1-1:** Volumen de Control del Balance de Energía del MCI.

**Fuente:** Elaboración Propia.

De lo anterior, observamos los flujos de energía que ingresan y salen del MCI, por lo tanto, aplicando la Primera Ley de la Termodinámica descrita en el capítulo anterior a este sistema que se encuentra en régimen estacionario, concluimos lo siguiente:

$$\dot{Q}_{comb.}(\dot{Q}_{gncomb.}+\dot{Q}_{oil}+\dot{Q}_{acomb.}) = \dot{W}_{mMCI} + \dot{Q}_{ge} + \dot{Q}_{rt} + \dot{Q}_{rm} + \dot{Q}_{pMCI}$$

Ecuación 3.2.1-1

Siendo  $\dot{Q}_{comb.}$ ,  $\dot{Q}_{gncomb.}$ ,  $\dot{Q}_{oil}$ ,  $\dot{Q}_{acomb.}$ ,  $\dot{W}_{mMCI}$ ,  $\dot{Q}_{ge}$ ,  $\dot{Q}_{rt}$ ,  $\dot{Q}_{rm}$ ,  $\dot{Q}_{pMCI}$  la energía de combustión, la energía del combustible, la energía producida por la quema de aceite que en nuestro planteamiento lo consideraremos nulo para la evaluación, la energía del aire de ingreso para la combustión que también se considerará nula debido a que la energía de entrada del aire a la combustión ya que la combustión del aire tiene valores muy cercanos a los del estado de referencia definido inicialmente ( $T_o = 25\text{ °C}$  y  $P_o = 1\text{ atm}$ ), el trabajo en el eje del motor, la energía de los gases de escape, la energía liberada del radiador del turbo, la energía liberada del radiador del motor y la energía de pérdidas en el MCI.

### 3.2.2 Balance de Energía al SEMCI. –

Los flujos de energía del SEMCI se muestran en la figura 3.2.2-1 a continuación:

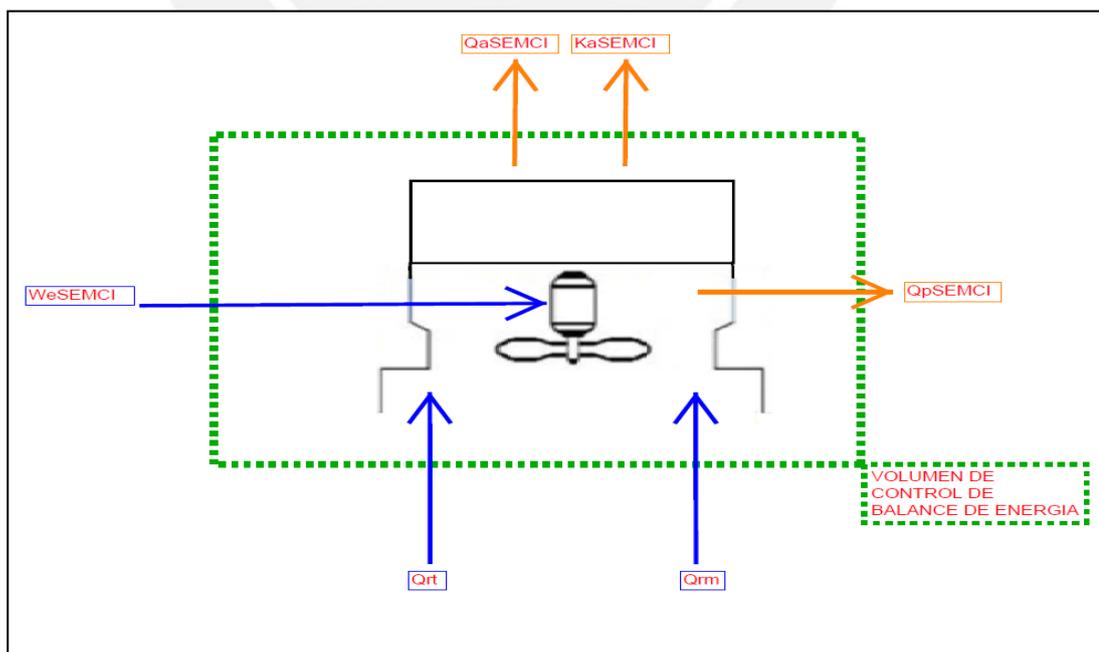


Figura 3.2.2-1: Volumen de Control del Balance de Energía del SEMCI.

Fuente: Elaboración Propia.

De lo anterior, observamos los flujos de energía que ingresan y salen del SEMCI, por lo tanto, aplicando la Primera Ley de la Termodinámica descrita en el capítulo anterior a este sistema que se encuentra en régimen estacionario, concluimos lo siguiente:

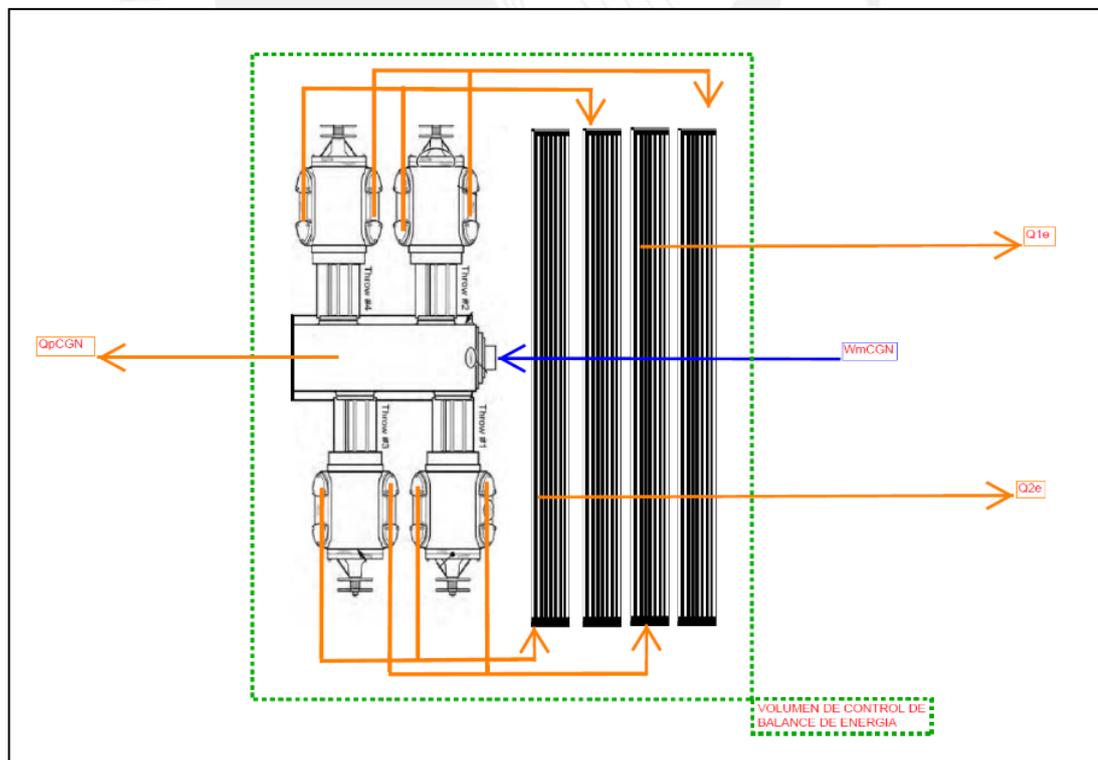
$$\dot{W}_{eSEMCI} + \dot{Q}_{rt} + \dot{Q}_{rm} = \dot{Q}_{aSEMCI} + \dot{K}_{aSEMCI} + \dot{Q}_{pSEMCI}$$

Ecuación: 3.2.2-1

Siendo  $\dot{W}_{eSEMCI}$ ,  $\dot{Q}_{rt}$ ,  $\dot{Q}_{rm}$ ,  $\dot{Q}_{aSEMCI}$ ,  $\dot{K}_{aSEMCI}$  y  $\dot{Q}_{pSEMCI}$  la potencia eléctrica para el aire de enfriamiento del MCI, la energía aire de enfriamiento del MCI, la velocidad cinética del aire de enfriamiento del MCI, el calor extraído del radiador del turbo y el calor extraído del radiador del bloque del motor.

### 3.2.3 Balance de Energía al CGN. –

Los flujos de energía del CGN se muestran en la figura 3.2.2-1 a continuación:



**Figura 3.2.3-1:** Volumen de Control del Balance de Energía del CGN.

**Fuente:** Elaboración Propia.

De lo anterior, observamos los flujos de energía que ingresan y salen del CGN, por lo tanto, aplicando la Primera Ley de la Termodinámica descrita en el capítulo anterior a este sistema que se encuentra en régimen estacionario, concluimos lo siguiente:

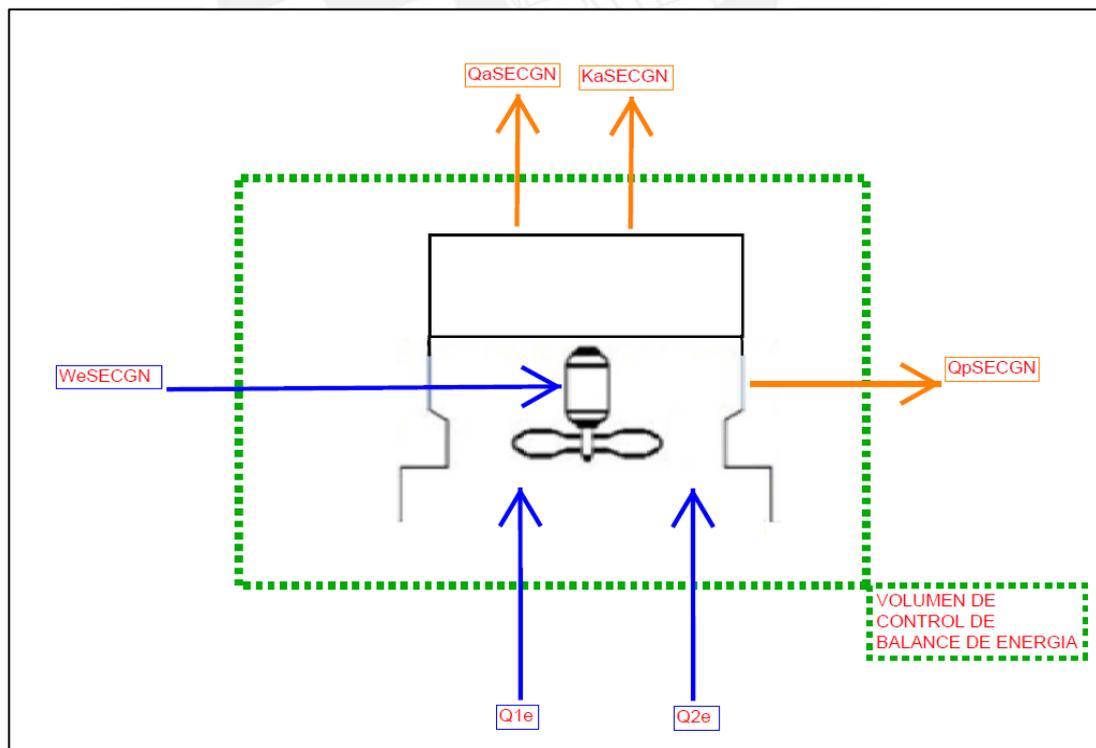
$$\dot{W}_{mCGN} = \dot{Q}_{1e} + \dot{Q}_{2e} + \dot{Q}_{pCGN}$$

Ecuación 3.2.3-1

Donde  $\dot{W}_{mCGN}$ ,  $\dot{Q}_{1e}$ ,  $\dot{Q}_{2e}$ ,  $\dot{Q}_{pCGN}$  son la potencia mecánica al eje del compresor, el calor extraído de la primera etapa de compresión, el calor extraído de la segunda etapa de compresión y el calor de pérdidas del compresor respectivamente.

### 3.2.4 Balance de Energía al SECGN. –

Los flujos de energía del SECGN se muestran en la figura 3.2.2-1 a continuación:



**Figura 3.2.4-1:** Volumen de Control del Balance de Energía del SECGN.

**Fuente:** Elaboración Propia.

De lo anterior, observamos los flujos de energía que ingresan y salen del SECGN, por lo tanto, aplicando la Primera Ley de la Termodinámica descrita en el capítulo anterior a este sistema que se encuentra en régimen estacionario, concluimos lo siguiente:

$$\dot{W}_{aSECGN} + \dot{Q}_{1e} + \dot{Q}_{2e} = \dot{Q}_{aSECGN} + \dot{K}_{aSECGN} + \dot{Q}_{pSECGN}$$

Ecuación 3.2.4-1

Siendo  $\dot{W}_{aSECGN}$ ,  $\dot{Q}_{aSECGN}$ ,  $\dot{K}_{aSECGN}$ ,  $\dot{Q}_{1e}$ ,  $\dot{Q}_{2e}$ ,  $\dot{Q}_{pSECGN}$  la potencia eléctrica para el enfriamiento del CGN, el calor de salida del sistema de enfriamiento del CGN, la velocidad cinética del aire de enfriamiento del CGN, el calor extraído de la primera etapa de compresión, el calor extraído de la segunda etapa de compresión y el calor de pérdidas del SECGN.

### 3.3 Balance de Exergía. –

Para comprender los detalles del funcionamiento de un sistema térmico y también las ubicaciones, causas y magnitudes de las pérdidas energéticas del sistema, un análisis exergético del sistema es indispensable en los subsistemas.

#### 3.3.1 Balance de Exergía al MCI. –

Basándonos en los conceptos teóricos del capítulo 2 determinamos el balance de la tasa de Exergía para el MCI que funciona a un ritmo constante, lo cual se puede expresar de la siguiente manera:

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{comb.}} = \dot{X}_{\dot{W}_{mMCI}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{ge}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{rt}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{rm}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{pMCI}} + \dot{X}_{\dot{d}MCI}$$

Ecuación 3.3.1-1

Donde  $\dot{X}_{gncomb.}$ ,  $\dot{X}_{acomb.}$ ,  $\dot{X}_{oil}$ ,  $\dot{X}_{\dot{W}_{mMCI}}$ ,  $\dot{X}_{\dot{Q}_{ge}}$ ,  $\dot{X}_{\dot{Q}_{rt}}$ ,  $\dot{X}_{\dot{Q}_{rm}}$ ,  $\dot{X}_{\dot{Q}_{pMCI}}$  y  $\dot{X}_{dMCI}$  son exergía del combustible, exergía del aire de combustión, exergía del aceite de combustión, exergía de la potencia al eje, exergía de los gases de escape, exergía de transferencia de calor por el radiador del turbo, exergía de transferencia de calor por el radiador del motor, exergía de transferencia de calor pérdidas y exergía destruida respectivamente.

### 3.3.2 Balance de Exergía al SEMCI. –

Basándonos en los conceptos teóricos del capítulo 2 determinamos el balance de la tasa de Exergía para el SEMCI que funciona a un ritmo constante, lo cual se puede expresar de la siguiente manera:

$$\dot{X}_{W_{aSEMCI}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{rt}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{rm}} = \dot{X}_{\dot{Q}_{aSEMCI}} + \dot{X}_{\dot{k}_{aSEMCI}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{pSEMCI}} + \dot{X}_{dSEMCI}$$

Ecuación 3.3.2-1

Donde  $\dot{X}_{W_{aSEMCI}}$ ,  $\dot{X}_{\dot{Q}_{rt}}$ ,  $\dot{X}_{\dot{Q}_{rm}}$ ,  $\dot{X}_{\dot{Q}_{aSEMCI}}$ ,  $\dot{X}_{\dot{k}_{aSEMCI}}$ ,  $\dot{X}_{\dot{Q}_{pSEMCI}}$ ,  $\dot{X}_{dSEMCI}$  son la exergía de EE del SEMCI, la exergía del radiador del turbo, la exergía del radiador del motor, la exergía del aire del SEMCI, la exergía cinética del aire del SEMCI, la exergía de pérdidas del SEMCI y la exergía destruida del SEMCI.

### 3.3.3 Balance de Exergía al CGN. –

Basándonos en los conceptos teóricos del capítulo 2 determinamos el balance de la tasa de Exergía para el CGN que funciona a un ritmo constante, lo cual se puede expresar de la siguiente manera:

$$\dot{X}_{W_{mCGN}} = \dot{X}_{\dot{Q}_{1e}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{2e}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{pCGN}} + \dot{X}_{dCGN}$$

Ecuación 3.3.3-1

Donde  $\dot{X}_{W_{mCGN}}$ ,  $\dot{X}_{\dot{Q}_{1e}}$ ,  $\dot{X}_{\dot{Q}_{2e}}$ ,  $\dot{X}_{\dot{Q}_{pCGN}}$ ,  $\dot{X}_{dCGN}$  son la exergía mecánica en el eje del compresor, la exergía del calor extraído de la primera etapa de compresión, la exergía del calor extraído de la segunda etapa de compresión, la exergía de pérdidas y la exergía de destrucción del CGN.

### 3.3.4 Balance de Exergía al SECGN. –

Basándonos en los conceptos teóricos del capítulo 2 determinamos el balance de la tasa de Exergía para el SECGN que funciona a un ritmo constante, lo cual se puede expresar de la siguiente manera:

$$\dot{X}_{W_{aSECGN}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{1e}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{2e}} = \dot{X}_{\dot{Q}_{aSECGN}} + \dot{X}_{k_{aSECGN}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{pSECGN}} + \dot{X}_{dSECGN}$$

Ecuación 3.3.4-1

Donde  $\dot{X}_{W_{aSECGN}}$ ,  $\dot{X}_{\dot{Q}_{1e}}$ ,  $\dot{X}_{\dot{Q}_{2e}}$ ,  $\dot{X}_{\dot{Q}_{aSECGN}}$ ,  $\dot{X}_{k_{aSECGN}}$ ,  $\dot{X}_{\dot{Q}_{pSECGN}}$  y  $\dot{X}_{dSECGN}$  son la exergía de EE del SECGN, la exergía del radiador de la primera etapa de compresión la exergía del radiador de la segunda etapa de compresión, la exergía del aire del SECGN, la exergía cinética del aire de SECGN, la exergía de pérdidas y la exergía destruida del SECGN.

### 3.4 Balance de Costos. –

Para determinar el balance de costos a cada subsistema primero debemos determinar cuál es el costo de energía aplicable a los flujos de energía del sistema. Para esto determinamos cual es el costo del Sm<sup>3</sup> de Gas Natural y cuál es el costo del kW-h de energía eléctrica, obteniendo esta información de la empresa distribuidora de Gas Natural y de Energía Eléctrica respectivamente.

### 3.4.1 Balance de costos al MCI. –

EL consumo principal del MCI es energía de combustión del combustible Gas Natural. Esta información de consumo se obtiene de la curva de rendimiento obtenida del software de simulación del motor el cual para determinada carga y velocidad de motor nos da un consumo determinado de Gas Natural. Haciendo el costo de Gas Natural de distribución igual a  $\dot{C}_{gn}$  que para efectos de este estudio lo llevaremos a la moneda de USD \$ (Dólares Americanos). Así mismo, el costo del equipo se proratea en el tiempo de vida útil estimado que para efectos de este estudio se considerará de 10 años. Es frecuente que el costo del gas natural se consiga en  $\left[\frac{USD \$}{Sm^3}\right]$ , lo cual permite cuantificar unidades energéticas de los consumos del sistema. Para esto solicitamos también la información del Poder Calorífico Inferior  $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$  y la Densidad  $\left[\frac{kg}{Sm^3}\right]$  del Gas Natural, lo que nos permite por medio de conversión de unidades obtener el Costo del Gas Natural en unidades monetarias por unidad energética  $\left[\frac{USD \$}{kJ}\right]$ . Esto sí permite cuantificar cada uno de los flujos de energía del sistema ya que se ha definido el costo energético producido por el consumo de 1 Sm<sup>3</sup> de Gas Natural. Teniendo esto en cuenta se muestra la ecuación de balance de costos. De todo lo anterior se tiene:

$$\dot{C}_{\dot{x}_{Q_{gncomb.}}} + \dot{C}_{MCI} + \dot{C}_{o\&mMCI} = \dot{C}_{\dot{x}_{W_{mMCI}}} + \dot{C}_{\dot{x}_{Q_{ge}}} + \dot{C}_{\dot{x}_{Q_{rt}}} + \dot{C}_{\dot{x}_{Q_{rm}}} + \dot{C}_{\dot{x}_{Q_{pMCI}}} + \dot{C}_{\dot{x}_{dMCI}}$$

Ecuación 3.4.1-1

Siendo  $\dot{C}_{\dot{x}_{Q_{gncomb.}}}$ ,  $\dot{C}_{MCI}$ ,  $\dot{C}_{\dot{x}_{W_{mMCI}}}$ ,  $\dot{C}_{\dot{x}_{Q_{ge}}}$ ,  $\dot{C}_{\dot{x}_{Q_{rt}}}$ ,  $\dot{C}_{\dot{x}_{Q_{rm}}}$ ,  $\dot{C}_{\dot{x}_{Q_{pMCI}}}$ ,  $\dot{C}_{o\&mMCI}$ ,  $\dot{C}_{\dot{x}_{dMCI}}$  los costos exergéticos de gas natural de combustión, inversión en el MCI, gases de escape, enfriamiento del turbo, enfriamiento del motor, perdidas de calor por la superficie del motor, de operación y mantenimiento y de exergía destruida.

### 3.4.2 Balance de costos al SEMCI. –

Al igual que el punto anterior nos basamos en los conceptos teóricos del capítulo 2 y definimos lo siguiente para el SEMCI. Sin embargo, no todos los consumos de energía son a base de Gas Natural ya que los consumos de energía en los Sistemas de Enfriamiento del MCI y del CGN utilizan energía eléctrica que tienen distintas unidades. Si hacemos el costo de la energía eléctrica igual a  $\dot{C}_{ee}$  con unidades  $\left[\frac{USD \$}{kWh}\right]$ , ya que son las unidades de distribución de la empresa distribuidora para el consumo de energía activa y  $\left[\frac{USD \$}{kVAR}\right]$  para el consumo de energía reactiva, independientemente si los consumos se dan dentro o fuera de la hora punta, Estos datos de los consumos de los motores eléctricos se obtienen del software de simulación del fabricante y se observan en sus datos de rendimiento de placa, lo que permite obtener los costos asociados.

$$\dot{C}_{\dot{X}_{W_{aSEMCI}}} + \dot{C}_{SEMCI} + \dot{C}_{o\&m_{SEMCI}} + \dot{C}_{\dot{X}_{Q_{rt}}} + \dot{C}_{\dot{X}_{Q_{rm}}} = \dot{C}_{\dot{X}_{Q_{aSEMCI}}} + \dot{C}_{\dot{X}_{k_{aSEMCI}}} + \dot{C}_{\dot{X}_{Q_{pSEMCI}}} + \dot{C}_{\dot{X}_{dSEMCI}}$$

Ecuación 3.4.2-1

Siendo  $\dot{C}_{\dot{X}_{W_{aSEMCI}}}$ ,  $\dot{C}_{SEMCI}$ ,  $\dot{C}_{\dot{X}_{Q_{rt}}}$ ,  $\dot{C}_{\dot{X}_{Q_{rm}}}$ ,  $\dot{C}_{\dot{X}_{Q_{aSEMCI}}}$ ,  $\dot{C}_{\dot{X}_{k_{aSEMCI}}}$ ,  $\dot{C}_{\dot{X}_{Q_{pMCI}}}$ ,  $\dot{C}_{\dot{X}_{dSEMCI}}$  los costos exergéticos de electricidad, de inversión en el SEMCI, de enfriamiento del turbo, de enfriamiento del motor, del calor del aire, de la energía cinética, de operación y mantenimiento y de exergía destruida.

### 3.4.3 Balance de costos al CGN. –

Al igual que el punto anterior nos basamos en los conceptos teóricos del capítulo 2 y definimos lo el balance de costos exergéticos siguiente para el CGN.

$$\dot{C}_{\dot{X}_{W_{mCGN}}} + \dot{C}_{CGN} + \dot{C}_{o\&m_{CGN}} = C_{\dot{X}_{Q_{1e}}} + C_{\dot{X}_{Q_{2e}}} + \dot{C}_{\dot{X}_{Q_{PCGN}}} + \dot{C}_{\dot{X}_{dCGN}}$$

Ecuación 3.4.3-1

Siendo  $\dot{C}_{\dot{X}_{W_{mCGN}}}$ ,  $\dot{C}_{CGN}$ ,  $\dot{C}_{\dot{X}_{Q_{1e}}}$ ,  $\dot{C}_{\dot{X}_{Q_{2e}}}$ ,  $\dot{C}_{\dot{X}_{Q_{PCGN}}}$ ,  $\dot{C}_{o\&m_{CGN}}$ ,  $\dot{C}_{\dot{X}_{dCGN}}$  el costo de exergía mecánica, costo de inversión en el CGN, costo de exergía de calor de primera etapa y segunda etapa, costo de exergía de pérdidas por la superficie del compresor, de operación y mantenimiento y de exergía destruida.

### 3.4.4 Balance de costos al SECGN. –

Al igual que el punto anterior nos basamos en los conceptos teóricos del capítulo 2 y definimos lo siguiente para el SECGN.

$$\begin{aligned} \dot{C}_{\dot{X}_{W_{mSECGN}}} + \dot{C}_{SECGN} + \dot{C}_{o\&m_{SECGN}} + \dot{C}_{\dot{X}_{Q_{1e}}} + \dot{C}_{\dot{X}_{Q_{2e}}} \\ = \dot{C}_{\dot{X}_{Q_{aSECGN}}} + \dot{C}_{\dot{X}_{k_{aSECGN}}} + \dot{C}_{\dot{X}_{Q_{pSECGN}}} + \dot{C}_{\dot{X}_{dSECGN}} \end{aligned}$$

Ecuación 3.4.4-1

Siendo,  $\dot{C}_{\dot{X}_{W_{mSECGN}}}$ ,  $\dot{C}_{SECGN}$ ,  $\dot{C}_{\dot{X}_{Q_{1e}}}$ ,  $\dot{C}_{\dot{X}_{Q_{2e}}}$ ,  $\dot{C}_{\dot{X}_{Q_{aSECGN}}}$ ,  $\dot{C}_{\dot{X}_{k_{aSECGN}}}$ ,  $\dot{C}_{\dot{X}_{Q_{pSECGN}}}$ ,  $\dot{C}_{o\&m_{SECGN}}$ ,  $\dot{C}_{\dot{X}_{dSECGN}}$  costo de exergía eléctrica, de inversión del SECGN, de calor de primera etapa y segunda etapa, de calor de aire, de energía cinética, de exergía de pérdidas por la superficie, de operación y mantenimiento y de exergía destruida.

## **CAPITULO 4**

### **DETERMINACION DE PARAMETROS Y ANALISIS DE RESULTADOS**

En el presente capítulo se determinarán cuáles son los parámetros para tener en cuenta para la determinación de los resultados cuantitativos de los flujos de masa, energía, exergía y costos cuyas ecuaciones se determinaron en el capítulo anterior. Una vez determinados los parámetros se definirá un punto de operación sobre el cual se obtendrán datos de operación del fabricante de los equipos para elaborar los cálculos numéricos respectivos. Este punto de operación se basa en una presión de ingreso al sistema de 45 barg y calidad de gas establecidos en el capítulo 1.

#### **4.1 Parámetros y Resultados del Balance de Masa. –**

En este estudio, se consideran flujos únicos, es decir no figuran como ingresos y salidas del volumen de control, esto en base a que el funcionamiento está en régimen estacionario y los flujos de entrada y salida son iguales en todo instante de tiempo en cada subsistema como se muestra a continuación.

##### **4.1.1 MCI. –**

Respecto de los flujos de masa principales, el consumo de combustible es obtenido de la curva de consumos de combustible por unidad de carga al que está sujeto el acople del motor. Este porcentaje de carga está determinado por la presión de entrada del gas natural para la compresión.

$$\dot{M}_{gncomb.} = f(P_{entrada}, \% \text{ carga})$$

Ecuación 4.1.1-1

Se establece esta forma de ecuación debido a que solo podemos considerar ciertas dependencias y no una ecuación que describa el comportamiento del consumo de combustible ya que los valores obtenidos para los cálculos son extraídos de los gráficos empíricos de funcionamiento mostrados en los anexos 2, 3, 4 y 5. Luego, para el punto de operación establecido se calcula:

Basados en el Anexo 2 a 45 barg de presión el cálculo el compresor trabaja consumiendo una potencia de

$$W_{mCGN} = 389.000 \text{ [hp]}$$

Luego, observando el ANEXO 4 se tiene que la potencia al 100% de Percent Load el MCI consume 420 Bhp por lo que haciendo la división entre potencias se obtiene un Percent Load de:

$$PL = 97.494 \text{ [%]}$$

Con este porcentaje de carga se observa del ANEXO 5 que el motor consume

$$FC@PL = 7,852.000 \text{ [BTU/hp-hr]}$$

Y haciendo la conversión de unidades respectiva tenemos una masa de gas natural combustible igual a:

$$M_{gncomb.} = 0.019 \text{ [kg/s]}$$

Teniendo en consideración el LHV<sub>gn</sub> mostrado en el ANEXO 1

Basados en los datos del anexo 6 observamos que el volumen de refrigerante circulante es constante en estado estable a determinadas RPM el cual es  $\dot{V}_{rt}$  y  $\dot{V}_{rm}$  que tiene unidades de l/min. Estos valores al multiplicarlos por la densidad del refrigerante  $\rho_r$  y convirtiendo unidades de tiempo nos da la masa de refrigerante  $\dot{M}_{rt}$  y  $\dot{M}_{rm}$ ,

Respecto del aire para la combustión se determina en base a la relación aire combustible que tiene el motor de fábrica.

$$\dot{M}_{acomb.} = R_{a/c}(\dot{M}_{gncomb.})$$

Ecuación 4.1.1-2

Luego de los datos de desempeño del fabricante obtenemos que la relación aire combustible en función de su masa es:

$$R_{a/c} = 39.600 \quad [\text{masa/masa}]$$

Este valor al multiplicarlo por el flujo de masa de gas natural de combustión, obtenemos el flujo de masa de aire de combustión:

$$\dot{M}_{acomb.} = 0.771 \quad [\text{kg/s}]$$

Luego el flujo másico de los gases de escape es la suma de los flujos anteriores.

$$\dot{M}_{ge} = 0.790 \quad [\text{kg/s}]$$

Para determinar los valores de flujo de refrigerante obtenemos los datos del fabricante en el ANEXO 6 en donde obtenemos los valores de flujo de refrigerante para el motor y turbo, luego:

$$\text{Mirt} = 2.229 \quad [\text{kg/s}]$$

$$\text{Mirm} = 8.061 \quad [\text{kg/s}]$$

#### 4.1.2 SEMCI. –

Respecto de la masa de aire que enfría los radiadores, se obtiene el flujo volumétrico usando el software de simulación del fabricante el cual da un valor  $\dot{V}_{aSEMCI}$  igual a 50,000 m<sup>3</sup>/h siendo la densidad del aire  $\rho_a = 1.065 \text{ kg/m}^3$  este volumen se divide en 75% y 25% para el motor y el turbo respectivamente, con este valor y la densidad del aire se obtiene el flujo másico deseado  $\dot{M}_{aSEMCI}$  como se muestra a continuación:

$$\dot{M}_{arm} = (\dot{V}_{arm})(\rho_a)$$

Ecuación 4.1.2-1

Siendo  $\dot{M}_{arm}$ ,  $\dot{V}_{arm}$  y  $\rho_a$  el flujo másico de aire de enfriamiento del motor, el flujo volumétrico de aire de enfriamiento del motor. Luego aplicando los datos numéricos se tiene:

$$\dot{M}_{arm} = (37,000 \text{ m}^3/\text{h})(1.065 \text{ kg/m}^3)$$

$$\text{Marm} = 11.089 \quad [\text{kg/s}]$$

Luego para el turbo tenemos:

$$\dot{M}_{art} = (\dot{V}_{art})(\rho_a)$$

Ecuación 4.1.2-2

Siendo  $\dot{M}_{art}$ ,  $\dot{V}_{art}$  y  $\rho_a$  el flujo másico de aire de enfriamiento del turbo, el flujo volumétrico de aire de enfriamiento del turbo. Luego con valores numéricos tenemos:

$$\dot{M}_{art} = (37,000 \text{ m}^3/\text{h})(1.065 \text{ kg}/\text{m}^3)$$

$$\dot{M}_{art} = 3.696 \quad [\text{kg}/\text{s}]$$

#### 4.1.3 CGN. –

El flujo de gas natural para la compresión se obtiene del simulador del fabricante donde se especifica para la determinada presión de entrada, el rendimiento del compresor en términos de capacidad productiva. Como consecuencia:

$$\dot{M}_{gncomp.} = f(P_{entrada})$$

Ecuación 4.1.3-2

Siendo  $\dot{M}_{gncomp.}$  y  $P_{entrada}$  los valores del flujo másico de gas natural para la compresión y presión de entrada al sistema.

Del ANEXO 3 se observa que a 45 barg el compresor produce el siguiente flujo volumétrico.

$$V_{gncomp} = 4,740.000 \quad [\text{Sm}^3/\text{h}]$$

#### 4.1.4 SECGN. –

Respecto de la masa de aire que enfría los radiadores se obtiene su flujo volumétrico del software de simulación del fabricante el cual da un valor  $\dot{V}_{aSEMCI}$  igual a 50,000 m<sup>3</sup>/h y que se divide en 25% cada uno ya que son 4 intercambiadores idénticos para las etapas de compresión; con este valor y la densidad del aire se obtiene el flujo

másico deseado:

$$\dot{M}_{aSECGN} = Ma1e - 1 + Ma1e - 2 + Ma2e - 1 + Ma2e - 2$$

Siendo  $\dot{M}_{aSECGN}$ ,  $Ma1e - 1$ ,  $Ma1e - 2$ ,  $Ma2e - 1$ ,  $Ma2e - 2$  el flujo másico de aire del SECGN, del primer radiador de primera etapa, del segundo radiador de primera etapa, del primer radiador de segunda etapa y el segundo radiador de la segunda etapa. En valores numéricos tenemos:

$$\begin{aligned}\dot{M}_{aSECGN} &= 3.696 \frac{kg}{s} + 3.696 \frac{kg}{s} + 3.696 \frac{kg}{s} + 3.696 \frac{kg}{s} \\ \dot{M}_{aSECGN} &= 14.786 \quad [kg/s]\end{aligned}$$

## 4.2 Parámetros y Resultados del Balance de Energía. –

A continuación, se determinarán los parámetros principales del balance de energía que servirán para obtener los valores de flujos energéticos.

### 4.2.1 MCI. –

Los parámetros que definen el resultado de las ecuaciones de balance de energía establecido con la ecuación 3.2.1-1 son los siguientes:

Calor de combustión:

$$\dot{Q}_{comb.}(\dot{Q}_{gncomb.} + \dot{Q}_{oil} + \dot{Q}_{acomb.}) = \dot{Q}_{gncomb.} + \dot{Q}_{oil} + \dot{Q}_{acomb.}$$

Ecuación 4.2.1-1

Siendo  $\dot{Q}_{comb.}(\dot{Q}_{gncomb.}+\dot{Q}_{oil}+\dot{Q}_{acomb.})$ ,  $\dot{Q}_{gncomb.}$ ,  $\dot{Q}_{oil}$ , y  $\dot{Q}_{acomb.}$  el calor de combustión, la energía de combustión del gas natural, la energía de combustión del aceite que en este estudio se considera nulo, y el la energía de combustión del aire que también se considera nula. Luego definimos cada uno de los parámetros y evaluamos numéricamente para el punto de operación definido:

Calor de Combustión del Gas Natural:

$$\dot{Q}_{gncomb.} = (\dot{M}_{gncomb.})(LHV_{gn})$$

Ecuación 4.2.1-2

Siendo,  $\dot{M}_{gncomb.}$  y  $LHV_{gn}$  el flujo másico de gas natural combustible y el poder calorífico inferior del gas natural. Numéricamente se tiene:

$$\dot{Q}_{gncomb.} = \left(0.019 \frac{kg}{s}\right) \left(48,365 \frac{kJ}{kg}\right) = 942,229 kW$$

El calor de combustión del aceite:

$$\dot{Q}_{oil} = (\dot{M}_{oil})(LHV_{oil}) = 0$$

Ecuación 4.2.1-3

Siendo,  $\dot{M}_{oil}$  y  $LHV_{oil}$  la masa de gas natural combustible y el poder calorífico inferior del gas natural. El calor de combustión del aire:

$$\dot{Q}_{acomb.} = (\dot{M}_{acomb.})(\dot{\Delta}h_{acomb.} + w_{acomb.}\dot{\Delta}h_{H_2O}) = 0$$

Ecuación 4.2.1-4

Siendo,  $\dot{Q}_{acomb.}$ ,  $\dot{M}_{acomb.}\dot{\Delta}h_{acomb.}$ ,  $w_{acomb.}$ ,  $\dot{\Delta}h_{H_2O}$  el calor de combustión del aire, el

flujo másico de aire de combustión, la entalpía del aire, la humedad relativa y la entalpía del vapor de agua.

Potencia mecánica del MCI:

$$\dot{W}_{mMCI} = \frac{(2)(3.142)(n_{MCI})(T_{MCI})}{6000}$$

Ecuación 4.2.1-5

Donde  $\dot{W}_{mMCI}$ ,  $n_{MCI}$  y  $T_{MCI}$  son la potencia mecánica al eje, el número de revoluciones del motor y el torque del motor. Sin embargo, un método directo para el cálculo de potencia es a través del uso de la curva de potencia del MCI en función de su porcentaje de carga definido anteriormente en el balance de masas. Luego evaluando numéricamente se tiene:

$$\dot{W}_{mMCI} = f(\%carga)$$

$$\%carga = PL = 97.5 \%$$

Luego interpolando se tiene que el trabajo en el eje es de  $\dot{W}_{mMCI} = 409.5 \text{ kW}$ .

Calor de los gases de escape:

$$\dot{Q}_{ge} = (\dot{M}_{acomb.} + \dot{M}_{gncomb.})(C_{pge})(T_{ige} - T_{sge})$$

Ecuación 4.2.1-6

Siendo  $\dot{Q}_{ge}$ ,  $\dot{M}_{acomb.}$ ,  $\dot{M}_{gncomb.}$ ,  $C_{pge}$ ,  $T_{ige}$ ,  $T_{sge}$  el calor de los gases de escape, el flujo másico de aire combustible, el flujo másico de gas natural combustible, el calor específico de los gases de escape y las temperaturas de ingreso y salida del escape. Luego numéricamente se tiene que

$$\dot{Q}_{ge} = \left(0.791 \frac{kg}{s}\right) \left(0.632 \frac{kJ}{kgK}\right) (823 \text{ K} - 298 \text{ K}) = 262.4 \text{ kW}$$

Tener en cuenta que el Cp de los gases de escape se puede aproximar de la siguiente manera:

$$Cp_{ge} = \sum \frac{M_i}{M_{ge}} (Cp_i)$$

Ecuación 4.2.1-6.1

Siendo  $M_i$  la masa del componente “i” de los gases de escape,  $Cp_i$  el calor específico de los gases de escape del componente “i”.

En este caso el  $Cp_{ge}$  se obtuvo de los datos de funcionamiento del MCI.

Adicionalmente [C. Sayin, 2006], el calor de gases de escape se puede obtener en base diferencia de entalpías de los productos y los reactantes del proceso de combustión. Lo cual da la siguiente ecuación:

$$\dot{W}_{mMCI} + \dot{Q}_{rt} + \dot{Q}_{rm} + \dot{Q}_{pMCI} = \bar{H}_P - \bar{H}_R = \sum_P (\bar{H}_f^o + \Delta\bar{H}) - \sum_R (\bar{H}_f^o + \Delta\bar{H})$$

Ecuación 4.2.1-7

Siendo  $\bar{H}_P$ ,  $\bar{H}_R$ ,  $\bar{H}_f^o + \Delta\bar{H}$  las entalpías de los productos, las entalpías de los reactantes, las entalpías de formación y las variaciones de entalpía.

Donde,

$$\Delta\bar{H} = \bar{H}_T - \bar{H}_{T_{ref}}$$

Ecuación 4.2.1-8

Siendo  $\bar{H}_T$ ,  $\bar{H}_{T_{ref}}$  la entalpía de en el punto de analisis y la entalpía de referencia.

Una vez conocido el valor de  $\bar{H}_P - \bar{H}_R$ , podemos obtener el total calor perdido

por flujo sobre las superficies del motor e intercambiadores de calor, insertando dichos valores en la Ecuación 3.2.1-1:

$$\dot{Q}_{ge} = (\dot{M}_{gncomb.})(LHV_{gn}) - \dot{W}_{mMCI} - \dot{Q}_{rt} - \dot{Q}_{rm} - \dot{Q}_{pMCI}$$

Ecuación 4.2.1-9

Sin embargo, de los valores de simulación del fabricante del MCI se obtiene el calor cedido por los gases de escape el cual dividiéndolo entre su flujo másico y diferencia de temperaturas nos permite obtener su Calor Específico ( $C_p$ ). Esto se puede tomar como aproximación para hacer variantes de distintos datos de entrada en el análisis del MCI. Otra variante para obtener estos valores sería hacer un análisis cromatográfico del combustible y de los de gases de escape.

Continuando con los parámetros que definen la ecuación de primera ley se tiene:

Calor del refrigerante del turbo:

$$\dot{Q}_{rt} = (\dot{M}_{rt})(\dot{C}_{pr})(T_{irt} - T_{srt})$$

Ecuación 4.2.1-10

Siendo  $\dot{M}_{rt}$ ,  $\dot{C}_{pr}$ ,  $T_{irt}$ ,  $T_{srt}$  el flujo másico de refrigerante del turbo, el calor específico del refrigerante y las temperaturas de entrada y salida del refrigerante al intercambiador de calor. Luego evaluando numéricamente se tiene:

$$\dot{Q}_{rt} = \left(2.229 \frac{kg}{s}\right) \left(3.5 \frac{kJ}{kgK}\right) (303 K - 311 K) = 62.4 kW$$

Calor de refrigerante del motor:

$$\dot{Q}_{rm} = (\dot{M}_{rm})(\dot{C}_{pr})(T_{irm} - T_{srm})$$

Ecuación 4.2.1-11

Siendo  $\dot{M}_{rm}$ ,  $\dot{C}_{pr}$ ,  $T_{irm}$ ,  $T_{srm}$  el flujo másico de refrigerante del motor, el calor específico del refrigerante y las temperaturas de entrada y salida del refrigerante al intercambiador de calor. Luego evaluando numéricamente se tiene:

$$\dot{Q}_{rm} = \left(8.061 \frac{kg}{s}\right) \left(3.5 \frac{kJ}{kgK}\right) (303 K - 311 K) = 225.7 kW$$

Calor de pérdidas del MCI.

$$\dot{Q}_{pMCI} = \dot{Q}_{comb.(\dot{Q}_{gncomb.+\dot{Q}_{oil}+\dot{Q}_{acomb.})} - \dot{W}_{mMCI} - \dot{Q}_{ge} - \dot{Q}_{rt} - \dot{Q}_{rm}$$

Ecuación 4.2.1-12

Siendo  $\dot{Q}_{pMCI}$  el calor de pérdidas por la superficie del MCI. Los demás términos fueron definidos líneas arriba. Luego evaluando numéricamente se tiene:

$$\dot{Q}_{pMCI} = 942.2 kW - 305.1 kW - 262.4 kW - 62.4 kW - 225.7 kW = 86.6 kW$$

#### 4.2.2 SEMCI. –

Los parámetros que definen el resultado de las ecuaciones de balance de energía para este subsistema son los siguientes:

Potencia del Motor eléctrico del SEMCI:

$$\dot{W}_{eSEMCI} = (\sqrt{3})(V_{eSEMCI})(I_{eSEMCI})(\cos(\Phi))_{eSEMCI}$$

Ecuación 4.2.2.1

Siendo,  $\dot{W}_{eSEMCI}$ ,  $V_{eSEMCI}$ ,  $I_{eSEMCI}$ ,  $\cos(\phi)_{eSEMCI}$  el Voltaje del SEMCI, la Corriente del SEMCI y el Factor de Potencia del motor del SEMCI. Datos numéricos obtenidos del ANEXO 7.

$$\dot{W}_{eSEMCI} = (\sqrt{3})(220 V)(20 A)(0.74) = 5.64 kW$$

Calor del aire del SMECI:

$$\dot{Q}_{aSEMCI} = (\dot{M}_{aSEMCI})(\dot{C}_{pa})(T_{iaSEMCI} - T_{sSEMCI})$$

Ecuación 4.2.2.2

Siendo  $\dot{M}_{aSEMCI}$ ,  $\dot{C}_{pa}$ ,  $T_{iaSEMCI}$  y  $T_{sSEMCI}$  el flujo másico de aire del SEMCI, el calor específico del aire y las temperaturas de entrada y salida del aire. Luego evaluando numéricamente se tiene:

$$\dot{Q}_{aSEMCI} = \left(14.8 \frac{kg}{s}\right) \left(1.012 \frac{kJ}{kgK}\right) (316 K - 298 K) = 269.3 kW$$

Energía Cinética del aire del SEMCI:

$$\dot{K}_{aSEMCI} = \frac{1}{2}(\dot{M}_{aSEMCI})(Vel_{aSEMCI})^2$$

Ecuación 4.2.2.3

Siendo  $\dot{K}_{aSEMCI}$ ,  $\dot{M}_{aSEMCI}$ ,  $Vel_{aSEMCI}$  la energía cinética del aire, el flujo másico del aire del SEMCI y la velocidad del aire del SEMCI.

$$\dot{K}_{aSEMCI} = \frac{1}{2} \left(14.786 \frac{kg}{s}\right) \left(15.450 \frac{m}{s}\right)^2 = 1.764 kW$$

Calor de pérdidas del SEMCI

$$\dot{Q}_{pSEMCI} = \dot{W}_{eSEMCI} - \dot{Q}_{aSEMCI} - \dot{K}_{aSEMCI} + \dot{Q}_{rt} + \dot{Q}_{rm}$$

Ecuación 4.2.2.4

Siendo  $\dot{Q}_{pSEMCI}$  el calor de pérdidas del SMECI y las demás expresiones definidas anteriormente

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{pSEMCI} &= 5.640 \text{ kW} - 269.3 \text{ kW} - 1.764 \text{ kW} + 62.4 \text{ kW} + 255.7 \text{ kW} \\ &= 22.7 \text{ kW}\end{aligned}$$

#### 4.2.3 CGN. –

Los parámetros que definen el resultado de las ecuaciones de balance de energía establecido con la ecuación 3.2.1-1 son los siguientes:

Potencia mecánica al eje del compresor:

$$\dot{W}_{mCGN} = f(P_{entrada})$$

Ecuación 4.2.3-1

Este valor se obtiene del software de simulación a teniendo como dato de entrada la presión de suministro de gas natural. Luego del ANEXO 3 observamos que a 45 barg la potencia consumida es  $\dot{W}_{mCGN} = 389 \text{ kW}$

Calor de primera etapa de compresión:

$$\dot{Q}_{1e} = (\dot{M}_{gncomp.})(\dot{C}_{pgn})(T_{s1e} - T_{i1e})$$

Ecuación 4.2.3-2

Siendo  $\dot{M}_{gncomp.}$ ,  $\dot{C}_{pgn}$ ,  $T_{s1e}$  y  $T_{i1e}$  flujo de másico de gas natural del compresor, el calor específico del aire y las temperaturas de entrada y salida del aire. Luego numéricamente se tiene:

$$\dot{Q}_{1e} = \left(0.977 \frac{kg}{s}\right) \left(2.57 \frac{kJ}{kgK}\right) (363 K - 318 K) = 112.9 kW$$

Calor de segunda etapa de compresión:

$$\dot{Q}_{2e} = (\dot{M}_{gncomp.})(\dot{C}_{pgn})(T_{s2e} - T_{i2e})$$

Ecuación 4.2.3-3

Siendo  $\dot{M}_{gncomp.}$ ,  $\dot{C}_{pgn}$ ,  $T_{s2e}$  y  $T_{i2e}$  flujo de másico de gas natural del compresor, el calor específico del aire y las temperaturas de entrada y salida del aire. Luego numéricamente se tiene:

$$\dot{Q}_{1e} = \left(0.977 \frac{kg}{s}\right) \left(2.57 \frac{kJ}{kgK}\right) (383 K - 318 K) = 163.2 kW$$

Calor de pérdidas del compresor de gas natural.

$$\dot{Q}_{pCGN} = \dot{W}_{mCGN} - \dot{Q}_{1e} - \dot{Q}_{2e}$$

Ecuación 4.2.3-4

Luego numéricamente se tiene:

$$\dot{Q}_{pCGN} = 289.9 kW - 112.9 kW - 163.2 kW = 13.62 kW$$

#### 4.2.4 SECGN. –

Los parámetros que definen el resultado de las ecuaciones de balance de energía para este subsistema son los siguientes:

Potencia del Motor eléctrico del SEMCI:

$$\dot{W}_{eSECGN} = (\sqrt{3})(V_{eSECGN})(I_{eSECGN})(\cos(\phi)_{eSECGN})$$

Ecuación 4.2.4.1

Siendo,  $\dot{W}_{eSECGN}$ ,  $V_{eSECGN}$ ,  $I_{eSECGN}$ ,  $\cos(\phi)_{eSECGN}$  el Voltaje del SECGN, la Corriente del SECGN y el Factor de Potencia del motor del SECGN. Luego numéricamente se tiene:

$$\dot{W}_{eSECGN} = (\sqrt{3})(220 V)(20 A)(0.74) = 5.64 kW$$

Calor del aire del SECGN

$$\dot{Q}_{aSECGN} = (\dot{M}_{aSECGN})(\dot{C}_{pa})(T_{iaSECGN} - T_{sSECGN})$$

Ecuación 4.2.4.2

Siendo  $\dot{M}_{aSECGN}$ ,  $\dot{C}_{pa}$ ,  $T_{iaSECGN}$  y  $T_{sSECGN}$  el flujo másico de aire del SECGN, el calor específico del aire y las temperaturas de entrada y salida del aire. Luego numéricamente se tiene:

$$\dot{Q}_{aSECGN} = \left(14.786 \frac{kg}{s}\right) \left(1.012 \frac{kJ}{kgK}\right) (316 K - 298 K) = 269.3 kW$$

Energía cinética del SECGN:

$$\dot{K}_{aSECGN} = \frac{1}{2} (\dot{M}_{aSECGN}) (Vel_{aSECGN})^2$$

Ecuación 4.2.4.3

Siendo  $\dot{K}_{aSECGN}$ ,  $\dot{M}_{aSECGN}$ ,  $Vel_{aSECGN}$  la energía cinética del aire, el flujo másico del aire del SECGN y la velocidad del aire del SECGN. Luego numéricamente se tiene:

$$\dot{K}_{aSECGN} = \frac{1}{2} (14.786)(14.45)^2 = 1.764 \text{ kW}$$

Calor de pérdidas del SECGN:

$$\dot{Q}_{pSECGN} = \dot{W}_{eSECGN} - \dot{Q}_{aSECGN} - \dot{K}_{aSECGN} + \dot{Q}_{1e} + \dot{Q}_{2e}$$

Ecuación 4.2.4.4

Luego numéricamente se tiene:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{pSECGN} &= 5.640 \text{ kW} - 269.2 \text{ kW} - 1.764 \text{ kW} + 112.9 \text{ kW} + 163.2 \text{ kW} \\ &= 10.732 \text{ kW} \end{aligned}$$

### 4.3 Parámetros y Resultados del Balance de Exergía. –

A continuación, se determinarán los parámetros principales del balance de exergía que servirán para obtener los valores de flujos energéticos.

### 4.3.1 MCI. –

Los parámetros que definen el resultado de las ecuaciones de balance de exergía establecido con la Ecuación 3.2.3-1 son los siguientes:

Exergía de la combustión:

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{gncomb.}} = (\dot{M}_{gncomb.})(\varphi_{gn})(LHV_{gn})$$

Ecuación 4.3.1-1

Siendo  $\dot{X}_{\dot{Q}_{gncomb.}}$ ,  $\varphi_{gn}$  y  $LHV_{gn}$  la exergía del calor de combustión, el factor exergético para el gas natural, y el Poder Calorífico inferior. Luego numéricamente se tiene:

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{gncomb.}} = \left(0.019 \frac{kg}{s}\right) (1.04) \left(48,365 \frac{kJ}{kg}\right) = 979.92 kW$$

Exergía mecánica al eje:

$$\dot{X}_{\dot{W}_{mMCI}} = \dot{W}_{mMCI} = 305.1 kW$$

Ecuación 4.3.1-1

Exergía de los gases de escape:

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{ge}} = \dot{Q}_{ge} + \left[ (\dot{M}_{ge})(T_o) + (C_{pge}) \left( \ln \left( \frac{T_o}{T_{ige}} \right) \right) - (R) \left( \ln \left( \frac{P_o}{P_{ge}} \right) \right) \right]$$

Ecuación 4.3.1-2

Siendo,  $\dot{Q}_{ge}$ ,  $\dot{M}_{ge}$ ,  $T_o$ ,  $C_{pge}$ ,  $T_{ige}$ ,  $R$ ,  $P_o$ ,  $P_{ge}$  el calor de los gases de escape, el flujo másico de los gases de escape, la temperatura ambiente, el calor específico de los gases de escape, la temperatura de ingreso de los gases de escape, la constante universal de los gases, la presión ambiental, y la presión de los gases de escape. Numéricamente tenemos lo siguiente:

$$\begin{aligned} \dot{X}_{\dot{Q}_{ge}} &= 262.44 \text{ kW} \\ &+ \left[ \left( 0.791 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) (298 \text{ K}) + \left( 0.632 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right) \left( \ln \left( \frac{298 \text{ K}}{823 \text{ K}} \right) \right) \right. \\ &\quad \left. - \left( 0.287 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right) \left( \ln \left( \frac{1 \text{ barg}}{1 \text{ barg}} \right) \right) \right] = 111.10 \text{ kW} \end{aligned}$$

Exergía del calor de enfriamiento del turbo

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{rt}} = \dot{Q}_{rt} - \dot{M}_{rt} * C_{pr} * T_o * \ln \left( \frac{T_{srt}}{T_{irt}} \right)$$

Ecuación 4.3.1-3

Siendo  $T_{\dot{Q}_{rt}}$ ,  $\dot{Q}_{rt}$  la temperatura de la superficie por la cual fluye el calor, el calor de enfriamiento del turbo. Los demás valores han sido definidos anteriormente. Luego evaluando cuantitativamente se tiene:

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{rt}} = 62.42 \text{ kW} - 2.23 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 3.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} * 298 \text{ K} * \ln \left( \frac{311}{303} \right) = 1.83 \text{ kW}$$

Exergía del calor de enfriamiento del motor

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{rm}} = \dot{Q}_{rt} - \dot{M}_{rm} * C_{pr} * T_o * \ln \left( \frac{T_{srm}}{T_{irm}} \right)$$

Ecuación 4.3.1-3

Siendo  $T_{\dot{Q}_{rt}}$ ,  $\dot{Q}_{rt}$  la temperatura de la superficie por la cual fluye el calor, el calor de enfriamiento del motor. Luego evaluando cuantitativamente se tiene:

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{rm}} = 225.7 \text{ kW} - 8.061 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 3.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} * 298 \text{ K} * \ln\left(\frac{311}{303}\right) = 6.60 \text{ kW}$$

Exergía de las pérdidas de calor por la superficie del MCI

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{pMCI}} = \left(1 - \frac{T_o}{T_{\dot{Q}_{pMCI}}}\right) \dot{Q}_{pMCI}$$

Ecuación 4.3.1-3

Siendo  $T_{\dot{Q}_{pMCI}}$ ,  $\dot{Q}_{pMCI}$  la temperatura de la superficie por la cual fluye el calor, el calor de pérdidas por la superficie.

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{pMCI}} = \left(1 - \frac{298 \text{ K}}{318 \text{ K}}\right) 86.17 \text{ kW} = 5.45 \text{ kW}$$

Exergía destruida en el MCI:

$$\dot{X}_{dMCI} = \dot{X}_{\dot{Q}_{gncomb.}} - \dot{X}_{W_{mMCI}} - \dot{X}_{\dot{Q}_{ge}} - \dot{X}_{\dot{Q}_{rt}} - \dot{X}_{\dot{Q}_{rm}} - \dot{X}_{\dot{Q}_{pMCI}}$$

Ecuación 4.3.1-4

$$\begin{aligned} \dot{X}_{dMCI} &= 979.92 \text{ kW} - 305.1 \text{ kW} - 102.2 \text{ kW} - 1.83 \text{ kW} - 6.62 \text{ kW} - 5.45 \text{ kW} \\ &= 558.79 \text{ kW} \end{aligned}$$

#### 4.3.2 SEMCI. –

Los parámetros que definen el resultado de las ecuaciones de balance de exergía para este subsistema son los siguientes:

Exergía de potencia eléctrica:

$$\dot{X}_{W_{aSEMCI}} = \dot{W}_{aSEMCI} = 5.64 \text{ kW}$$

Ecuación 4.3.2-1

Exergía del calor de enfriamiento del turbo:

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{rt}} = \left(1 - \frac{T_o}{T_{\dot{Q}_{rt}}}\right) \dot{Q}_{rt} = 1.83 \text{ kW}$$

Ecuación 4.3.2-2

Exergía del calor de enfriamiento del motor:

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{rm}} = \left(1 - \frac{T_o}{T_{\dot{Q}_{rm}}}\right) \dot{Q}_{rm} = 6.62 \text{ kW}$$

Ecuación 4.3.2-3

Exergía del aire de enfriamiento del SEMCI:

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{aSEMCI}} = \left(1 - \frac{T_o}{T_{\dot{Q}_{aSEMCI}}}\right) \dot{Q}_{aSEMCI}$$

Ecuación 4.3.2-4

Siendo  $T_{\dot{Q}_{aSEMCI}}$ ,  $\dot{Q}_{aSEMCI}$ , la temperatura de la superficie por la cual existe el flujo de calor y el flujo de calor. Luego evaluando numéricamente se tiene:

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{aSEMCI}} = \left(1 - \frac{298 \text{ K}}{307 \text{ K}}\right) 269.3 \text{ kW} = 7.89 \text{ kW}$$

Exergía Cinética del SEMCI:

$$\dot{X}_{k_{aSEMCI}} = \dot{k}_{aSEMCI} = 1.764 \text{ kW}$$

Ecuación 4.3.2-5

Exergía de pérdidas del SEMCI:

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{pSEMCI}} = \left(1 - \frac{T_o}{T_{\dot{Q}_{pSEMCI}}}\right) \dot{Q}_{pSEMCI}$$

Ecuación 4.3.2-6

Siendo  $T_{\dot{Q}_{pSEMCI}}$ ,  $\dot{Q}_{pSEMCI}$ , la temperatura de la superficie por la cual existe el flujo de calor y el flujo de calor. Luego evaluando numéricamente se tiene:

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{pSEMCI}} = \left(1 - \frac{298 \text{ K}}{318 \text{ K}}\right) 22.7 \text{ kW}$$

Exergía destruida del SEMCI:

$$\dot{X}_{dSEMCI} = \dot{X}_{W_{aSEMCI}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{rt}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{rm}} - \dot{X}_{\dot{Q}_{aSEMCI}} - \dot{X}_{k_{aSEMCI}} - \dot{X}_{\dot{Q}_{pSEMCI}}$$

Ecuación 4.3.2-7

Luego evaluando numéricamente se tiene:

$$\begin{aligned} \dot{X}_{dSEMCI} &= 5.64 \text{ kW} + 1.83 \text{ kW} + 6.62 \text{ kW} - 7.89 \text{ kW} - 1.764 \text{ kW} - 1.425 \text{ kW} \\ &= 3 \text{ kW} \end{aligned}$$

### 4.3.3 CGN. –

Los parámetros que definen el resultado de las ecuaciones de balance de exergía para

este subsistema son los siguientes:

Exergía mecánica del CGN:

$$\dot{X}_{W_{mCGN}} = \dot{W}_{mCGN} = 275.32 \text{ kW}$$

Ecuación 4.3.3-1

Exergía del intercambiador de primera etapa:

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{1e}} = \left(1 - \frac{T_o}{T_{\dot{Q}_{1e}}}\right) \dot{Q}_{1e}$$

Ecuación 4.3.3-2

Siendo  $T_{\dot{Q}_{1e}}$ ,  $\dot{Q}_{1e}$ , la temperatura de la superficie por la cual existe el flujo de calor y el flujo de calor. Luego evaluando numéricamente se tiene:

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{1e}} = \left(1 - \frac{298 \text{ K}}{340.5 \text{ K}}\right) 112.9 \text{ kW} = 14.1 \text{ kW}$$

Exergía del intercambiador de segunda etapa:

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{2e}} = \left(1 - \frac{T_o}{T_{\dot{Q}_{2e}}}\right) \dot{Q}_{2e}$$

Ecuación 4.3.3-3

Siendo  $T_{\dot{Q}_{2e}}$ ,  $\dot{Q}_{2e}$ , la temperatura de la superficie por la cual existe el flujo de calor y el flujo de calor. Luego evaluando numéricamente se tiene:

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{2e}} = \left(1 - \frac{298 \text{ K}}{350.5 \text{ K}}\right) 163.2 \text{ kW} = 24.45 \text{ kW}$$

Exergía de pérdidas por la superficie del compresor:

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{pCGN}} = \left(1 - \frac{T_o}{T_{\dot{Q}_{pCGN}}}\right) \dot{Q}_{pCGN}$$

Ecuación 4.3.3-4

Siendo  $T_{\dot{Q}_{pCGN}}$ ,  $\dot{Q}_{pCGN}$ , la temperatura de la superficie por la cual existe el flujo de calor y el flujo de calor. Luego evaluando numéricamente se tiene:

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{pCGN}} = \left(1 - \frac{298 K}{318 K}\right) 13.62 kW$$

Exergía de destrucción del CGN:

$$\dot{X}_{dCGN} = \dot{X}_{W_{mCGN}} - \dot{X}_{\dot{Q}_{1e}} - \dot{X}_{\dot{Q}_{2e}} - \dot{X}_{\dot{Q}_{pCGN}}$$

Ecuación 4.3.3-5

$$\dot{X}_{dCGN} = 275.32 kW - 14.103 kW - 24.45 kW - 0.86 kW = 250.4 kW$$

#### 4.3.4 SECGN. –

Los parámetros que definen el resultado de las ecuaciones de balance de exergía:

$$\dot{X}_{W_{aSECGN}} = \dot{W}_{aSECGN} = 5.64 kW$$

Ecuación 4.3.4-1

$\dot{X}_{\dot{Q}_{1e}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{2e}}$  definidos en las ecuaciones 4.3.2-7 y 4.3.2-8

Exergía del calor del aire del SECGN:

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{aSECGN}} = \left(1 - \frac{T_o}{T_{\dot{Q}_{aSECGN}}}\right) \dot{Q}_{aSECGN}$$

Ecuación 4.3.4-2

Siendo  $T_{\dot{Q}_{aSECGN}}$ ,  $\dot{Q}_{aSECGN}$ , la temperatura de la superficie por la cual existe el flujo de calor y el flujo de calor. Luego evaluando numéricamente:

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{aSECGN}} = \left(1 - \frac{298 \text{ K}}{307 \text{ K}}\right) 269.3 \text{ kW}$$

Exergía Cinética del SECGN:

$$\dot{X}_{\dot{k}_{aSECGN}} = \dot{k}_{aSECGN} = 1.764 \text{ kW}$$

Ecuación 4.3.4-3

Exergía del Calor de pérdidas del SECGN:

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{pSECGN}} = \left(1 - \frac{T_o}{T_{\dot{Q}_{pSECGN}}}\right) \dot{Q}_{pSECGN}$$

Ecuación 4.3.4-3

Siendo  $T_{\dot{Q}_{pSECGN}}$ ,  $\dot{Q}_{pSECGN}$ , la temperatura y el flujo de calor.

$$\dot{X}_{\dot{Q}_{pSECGN}} = \left(1 - \frac{298 \text{ K}}{318 \text{ K}}\right) 10.732 \text{ kW} = 0.675 \text{ kW}$$

Exergía de destrucción del SECGN

$$\dot{X}_{dSECGN} = \dot{X}_{W_{aSECGN}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{1e}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{2e}} - \dot{X}_{\dot{Q}_{aSECGN}} - \dot{X}_{\dot{k}_{aSECGN}} - \dot{X}_{\dot{Q}_{pSECGN}}$$

Ecuación 4.3.4-4

$$\dot{X}_{dSECGN} = 5.64 \text{ kW} + 14.103 \text{ kW} + 24.445 \text{ kW} - 7.89 \text{ kW} - 1.764 \text{ kW} \\ - 0.675 \text{ kW} = 33.853 \text{ kW}$$

#### 4.4 Parámetros y Resultados del Balance de Costos. –

A continuación, se determinarán parámetros de costos de los principales del balance de costos que servirán para obtener los valores de flujos de costos de los subsistemas. Tener en cuenta que el costo del Gas Natural es  $6.14 \times 10^{-6}$  USD \$/kJ y el de energía eléctrica es de  $0.193 \times 10^{-6}$  USD \$/kWs, cuyos valores son obtenidos de los recibos de luz y gas de las respectivas empresas distribuidoras.

##### 4.4.1 MCI. –

Los parámetros que definen el resultado de las ecuaciones de balance de costos:

$$\dot{C}_{gn}(\dot{X}_{\dot{Q}_{comnb.}}) + \dot{C}_{MCI} + \dot{C}_{o\&m_{MCI}} = \dot{C}_{gn} \left( \dot{X}_{W_{mMCI}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{ge}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{rt}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{rm}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{pMCI}} \right) + \dot{C}_{\dot{x}_{dMCI}}$$

Ecuación 4.4.1-1

Siendo,  $\dot{C}_{gn}$  el costo del gas natural,  $\dot{C}_{MCI}$  es el costo del MCI prorrateado en en tiempo de vida útil del equipo,  $\dot{C}_{o\&m_{MCI}}$  son costos de operación y mantenimiento y  $\dot{C}_{\dot{x}_{dMCI}}$  son los costos asociados a las pérdidas por irreversibilidades del subsistema. Los demás términos se definieron ya anteriormente. Luego evaluando numéricamente tenemos:

##### 4.4.2 SEMCI. –

Los parámetros que definen el resultado de las ecuaciones de balance de costos para este subsistema son los siguientes:

$$\begin{aligned}
& (\dot{C}_{ee})(\dot{X}_{W_{aSEMCI}}) + \dot{C}_{SEMCI} + \dot{C}_{o\&m_{SEMCI}} \\
& = \dot{C}_{gn}(\dot{X}_{\dot{Q}_{aSEMCI}} - \dot{X}_{\dot{Q}_{rt}} - \dot{X}_{\dot{Q}_{rm}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{pSEMCI}}) + \dot{C}_{ee}(\dot{X}_{\dot{k}_{aSEMCI}}) + \dot{C}_{\dot{x}_{aSEMCI}}
\end{aligned}$$

Ecuación 4.4.2-1

Siendo  $\dot{C}_{ee}$  costo de energía eléctrica,  $\dot{C}_{SEMCI}$  el costo de inversión en el SECGN prorrateado en el tiempo de vida útil,  $\dot{C}_{o\&m_{SEMCI}}$  son costos de operación y mantenimiento y  $\dot{C}_{\dot{x}_{aSEMCI}}$  son los costos asociados a las pérdidas por irreversibilidades del subsistema. Los demás términos se definieron ya anteriormente.

#### 4.4.3 CGN. –

Los parámetros que definen el resultado de las ecuaciones de balance de costos para este subsistema son los siguientes:

$$\dot{C}_{gn}(\dot{X}_{W_{mCGN}}) + \dot{C}_{CGN} + \dot{C}_{o\&m_{CGN}} = \dot{C}_{gn}(\dot{X}_{\dot{Q}_{1e}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{2e}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{pCGN}}) + \dot{C}_{\dot{x}_{aCGN}}$$

Ecuación 4.4.3-1

Siendo  $\dot{C}_{gn}$  el costo de gas natural,  $\dot{C}_{SECGN}$ , el costo de inversión del SECGN  $\dot{C}_{o\&m_{CGN}}$  son costos de operación y mantenimiento y  $\dot{C}_{\dot{x}_{aSECGN}}$  son los costos asociados a las pérdidas por irreversibilidades del subsistema.

#### 4.4.4 SECGN. –

Los parámetros que definen el resultado de las ecuaciones de balance de costos para este subsistema son los siguientes:

$$\begin{aligned}
& \dot{C}_{ee}(\dot{X}_{W_{aSECGN}}) + \dot{C}_{gn}(\dot{X}_{\dot{Q}_{1e}} + \dot{X}_{\dot{Q}_{2e}}) + \dot{C}_{SECGN} + \dot{C}_{o\&m_{SECGN}} = \dot{C}_{gn}(\dot{X}_{\dot{Q}_{aSECGN}} + \\
& \dot{X}_{\dot{Q}_{pSECGN}}) + \dot{C}_{ee}(\dot{X}_{\dot{k}_{aSECGN}}) + \dot{C}_{\dot{x}_{aSECGN}}
\end{aligned}$$

Ecuación 4.4.4-1

Siendo  $\dot{C}_{ee}$  el costo de energía eléctrica,  $\dot{C}_{SECGN}$  el costo de inversión en el SECGN,  $\dot{C}_{o\&mCGN}$  son costos de operación y mantenimiento y  $\dot{C}_{x_{dSECGN}}$  son los costos asociados a las pérdidas por irreversibilidades del sistema.



## CAPITULO 5

### ANALISIS TERMOECONOMICO

En el presente capítulo se estudian y determinan las correlaciones entre las eficiencias energéticas y exergéticas del sistema. Estas correlaciones para diferentes puntos de operación se utilizan para elaborar gráficas de análisis termoeconómico que sirven como línea base para el control de la operación eficiente del sistema.

#### **5.1 Determinación de la relación existente entre la eficiencia de la UCGN y los costos de producción de GNC. –**

Los costos asociados a los ciclos de trabajo se ven determinados por el tiempo de utilización del sistema para el llenado de los contenedores de GNC. Esta capacidad es variable y determina el tiempo de llenado juntamente con la capacidad instalada y lista para producción teniendo como dato principal del sistema la presión de entrada de Gas natural. Para el presente estudio tomaremos un sistema de contenedores cuyas características se muestran en los anexos de esta tesis. El dato principal para tener en consideración es la capacidad de llenado en Sm<sup>3</sup> a 250 barg. En este caso específico la capacidad de llenado de los contenedores es de 7,000 Sm<sup>3</sup>.

Para determinar el tiempo de llenado de cada uno de los puntos de operación escogidos observamos las curvas de operación del sistema de compresión que para cada condición de operación tiene una capacidad de producción determinada. Basados en los datos de desempeño y capacidades de la UCGN obtenemos:

ITEM	Presión de Suministro [barg]	Flujo Volumetrico [Sm <sup>3</sup> /h]	Capacidad de Contenedor [Sm <sup>3</sup> ]	Tiempo por Ciclo [h]	Tiempo por Ciclo [s]	Mantenimiento USD \$/ciclo
1.000	45.000	4,740.000	7,000.000	1.477	5,316.456	1.667
2.000	40.000	4,089.000	7,000.000	1.712	6,162.876	1.917
3.000	35.000	3,455.000	7,000.000	2.026	7,293.777	2.204

**Tabla 5.1-1:** Cuadro de Estimación de Tiempos de Llenado.

**Fuente:** Elaboración propia.

De forma iterativa podemos hacer los balances mostrados en capítulos anteriores para las diferentes presiones de entrada de suministro de Gas. En base a esto, determinamos la eficiencia exergética en función de conocer las irreversibilidades del sistema y sus costos asociados como se muestran de ejemplo en los cálculos anexos. Para el punto de operación numero 1 tenemos el siguiente resumen basados en los cálculos del capítulo anterior y que también se muestran en los anexos adjuntos.

CXQgncomb.	=	32.006	[\$/ciclo]	CXWmMCI	=	9.964	[\$/ciclo]
CMCI	=	3.699	[\$/ciclo]	CXQge	=	3.629	[\$/ciclo]
Co&mMCI	=	1.667	[\$/ciclo]	CXQrt	=	0.060	[\$/ciclo]
				CXQrm	=	0.216	[\$/ciclo]
				CXQpMCI	=	0.178	[\$/ciclo]
				CXdMCI	=	23.325	[\$/ciclo]

**Tabla 5.1-2:** Cuadro de Balance de Costos del MCI

**Fuente:** Elaboración propia.

CXWaSEMCI	=	0.595	[\$/ciclo]	CXQaSEMCI	=	0.255	[\$/ciclo]
CSEMCI	=	2.466	[\$/ciclo]	CXKaSEMCI	=	0.186	[\$/ciclo]
CXQrt	=	0.060	[\$/ciclo]	CXQpSEMCI	=	0.047	[\$/ciclo]
CXQrm	=	0.216	[\$/ciclo]	CXdSEMCI	=	3.681	[\$/ciclo]
Co&mSEMCI	=	0.833	[\$/ciclo]				

**Tabla 5.1-3:** Cuadro de Balance de Costos del SEMCI

**Fuente:** Elaboración propia.

CXWmCGN	=	9.466	[\$/ciclo]		CXQ1e	=	0.461	[\$/Ciclo]
CCGN	=	3.699	[\$/ciclo]		CXQ2e	=	0.798	[\$/Ciclo]
Co&mCGN	=	1.667	[\$/Ciclo]		CXQpCGN	=	0.028	[\$/Ciclo]
					CXdCGN	=	13.544	[\$/Ciclo]

**Tabla 5.1-4:** Cuadro de Balance de Costos del CGN  
Fuente: Elaboración propia.

CXWaSECGN	=	0.595	[\$/ciclo]		CXQaSECGN	=	0.255	[\$/ciclo]
CSECGN	=	2.466	[\$/ciclo]		CXKaSECGN	=	0.186	[\$/ciclo]
CXQ1e	=	0.461	[\$/Ciclo]		CXQpSECGN	=	0.022	[\$/ciclo]
CXQ2e	=	0.798	[\$/Ciclo]		CXdSECGN	=	4.689	[\$/ciclo]
Co&mSECGN	=	0.833	[\$/ciclo]					

**Tabla 5.1-5:** Cuadro de Balance de Costos del SECGN  
Fuente: Elaboración propia.

Luego para un punto de operación determinado recordemos que recordemos que la eficiencia exergética se define de la siguiente manera:

$$\eta_x = \frac{\text{exergía de salida}}{\text{exergía de entrada}}$$

Ecuación 5.1-1

Siendo la exergía de salida para un ciclo de trabajo la diferencia entre la exergía generada y las irreversibilidades del proceso de conversión de energía. Al ser la exergía de salida una variable dependiente de las irreversibilidades del sistema, la eficiencia exergética se encuentra directamente relacionada también con las irreversibilidades del sistema. Luego,

$$\eta_{X_{SISTEMA}} = \frac{\text{exergía de entrada} - \text{exergía destruida}}{\text{exergía de entrada}}$$

Ecuación 5.1-2

Simplificando se tiene

$$\eta_{X_{SISTEMA}} = 1 - \frac{\text{exergía destruida}}{\text{exergía de entrada}}$$

Ecuación 5.1-3

Expresado de otra forma:

$$\eta_{X_{SISTEMA}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \dot{X}_{d_i}}{\sum_{j=1}^{j=m} \dot{X}_{(Q,W)_i}}$$

Ecuación 5.1-4

Siendo esta fórmula la relación entre la sumatoria de exergías destruidas sobre la sumatoria de exergía en forma de calor o potencia. Luego analizando numéricamente para el primer punto de operación y basados en los resultados de los cálculos anteriores que también se detallan en los anexos, tenemos:

$$\eta_{X_{SISTEMA_{pgn}}} = 1 - \frac{\dot{X}_{dMCI} + \dot{X}_{dSEMCI} + \dot{X}_{dCGN} + \dot{X}_{dSECGN}}{\dot{X}_{Qgncomb.} + \dot{X}_{WaSEMCI} + \dot{X}_{WaSECGN}}$$

$$\eta_{X_{SISTEMA_{45}}} = 1 - \frac{549.871 \text{ kW} + 3.061 \text{ kW} + 250.401 \text{ kW} + 33.928 \text{ kW}}{979.92 \text{ kW} + 5.640 \text{ kW} + 5.640 \text{ kW}}$$

$$\eta_{X_{SISTEMA_{45}}} = 1 - \frac{837.261 \text{ kW}}{991.200 \text{ kW}} = 0.155 = 15.500 \%$$

Del mismo modo usamos los cálculos anexos para determinar las eficiencias exergéticas en otros puntos de operación a 40 barg y 35 bar de presión de entrada de Gas Natural al Sistema.

$$\eta_{X_{SISTEMA_{40}}} = 14.000 \%$$

Y

$$\eta_{X_{SISTEMA_{35}}} = 12.500 \%$$

Por otro lado, calculamos los costos de producción de GNC:

$$\dot{C}_{X_{GNC}} = \sum_{i=1}^{i=n} \dot{C}_{X_i}$$

Ecuación 5.1-5

Luego evaluando cada elemento tenemos:

$$\begin{aligned} \dot{C}_{X_{GNC_i}} = & \dot{C}_{X_{Qcomb.}} + \dot{C}_{X_{MCI}} + \dot{C}_{o\&mMCI} + \dot{C}_{X_{WaSEMCI}} + \dot{C}_{SEMCI} + \dot{C}_{o\&mSEMCI} + \dot{C}_{CGN} \\ & + \dot{C}_{o\&mCGN} + \dot{C}_{X_{WaSECGN}} + \dot{C}_{SECGN} + \dot{C}_{o\&mSECGN} \end{aligned}$$

Ecuación 5.1-6

Numéricamente se tiene:

$$\begin{aligned} \dot{C}_{X_{GNC_{45}}} = & 32.006 \frac{\$}{ciclo} + 3.699 \frac{\$}{ciclo} + 1.667 \frac{\$}{ciclo} + 0.595 \frac{\$}{ciclo} + 2.466 \frac{\$}{ciclo} \\ & + 0.833 \frac{\$}{ciclo} + 3.699 \frac{\$}{ciclo} + 1.667 \frac{\$}{ciclo} + 0.595 \frac{\$}{ciclo} \\ & + 2.466 \frac{\$}{ciclo} + 0.833 \frac{\$}{ciclo} \\ \dot{C}_{X_{GNC}} = & 50.525 \frac{\$}{ciclo} \end{aligned}$$

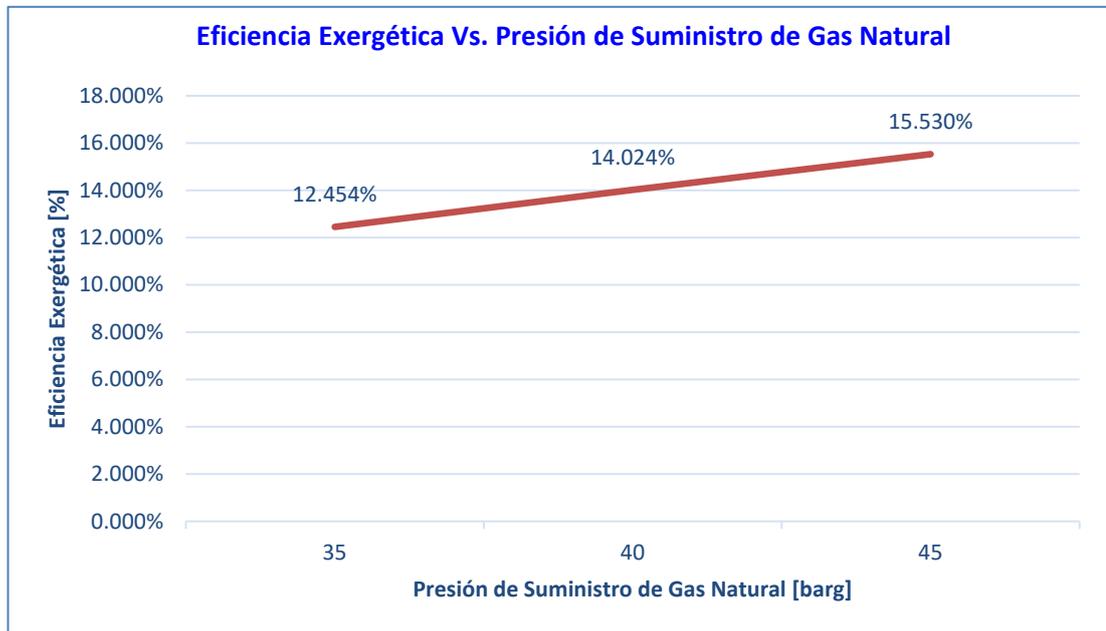
Del mismo modo evaluamos para los otros dos puntos de operación:

$$\dot{C}_{X_{GNC_{40}}} = 53.691 \frac{\$}{ciclo}$$

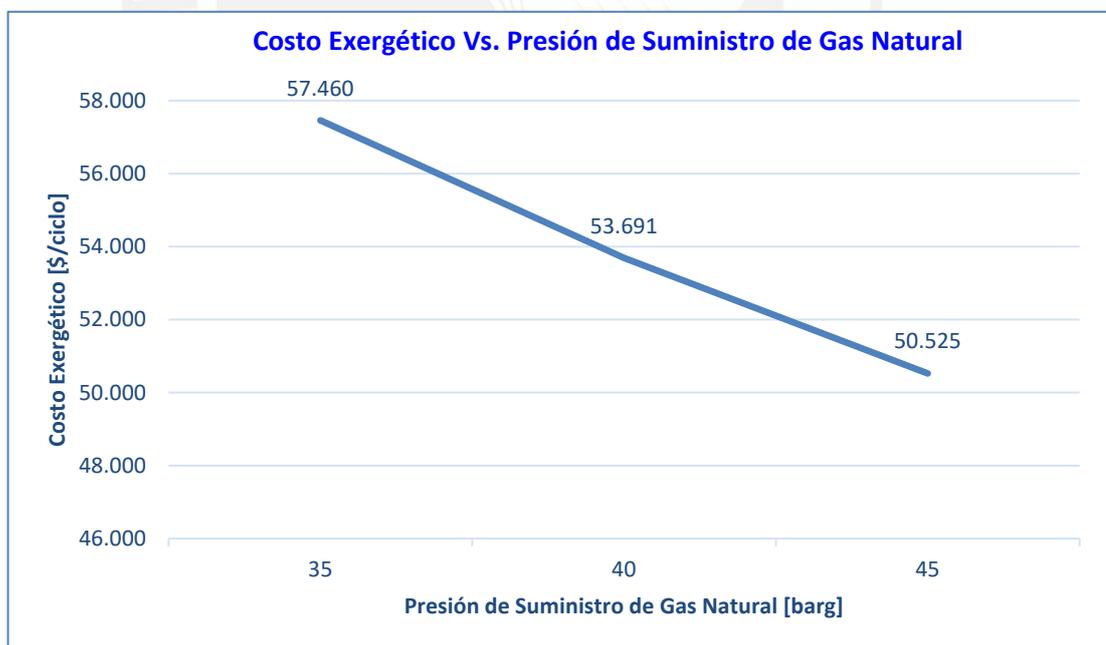
Y

$$\dot{C}_{X_{GNC_{35}}} = 57.460 \frac{\$}{ciclo}$$

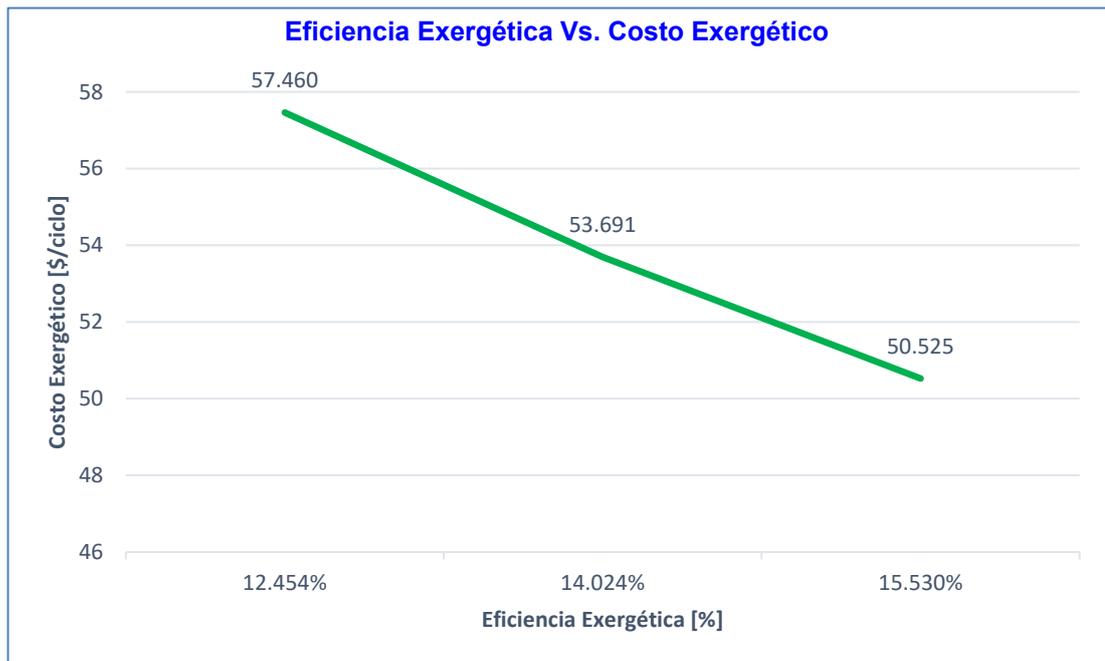
Estos costos de producción de GNC están directamente relacionados con los procesos exergéticos del sistema como se demuestra en los cálculos y en las siguientes gráficas:



**Figura 5.1-1:** Costo Exergético Vs. Presión de Suministro a la UCGN.  
**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 5.1-2:** Costo Exergético Vs. Presión de Suministro a la UCGN.  
**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 5.1-3:** Relación entre Eficiencia Exergética y Costo Exergético de Producción de GNC de la UCGN basado en los cálculos anexos.

**Fuente:** Elaboración propia.

Basados en la gráfica demostramos que la hipótesis es acertada ya que a menor eficiencia exergética mayor es el costo de producción exergético de GNC. Este concepto está sustentado en el hecho de que las irreversibilidades del proceso afectarán directamente los montos de exergía destruida, así como disminuirá también la eficiencia exergética del sistema ya que de ser el caso de que haya más irreversibilidades la eficiencia disminuye, pero el costo de producción aumenta, es decir, eficiencia exergética es menor debido a que esta cuenta las irreversibilidades del proceso. Por lo tanto, concluimos que la hipótesis de este estudio es correcta.

De esto anterior podemos establecer:

$$C_{GNC} = f \left( \eta_{X_{SISTEMA}} = 1 - \frac{\text{exergía destruida}}{\text{exergía de entrada}} \right)$$

Ecuación 5.1-7

## CONCLUSIONES

En el presente capítulo se mostrarán las conclusiones basadas en los resultados obtenidos en los análisis cualitativos y cuantitativos, energéticos y exergéticos del sistema general y los subsistemas de la UCGN. Así mismo se refleja que las conclusiones conllevan al cumplimiento del objetivo principal y secundarios del presente estudio.

- Concluimos que la hipótesis del presente estudio es correcta ya que se observa en el análisis de sensibilidad de las variables dependientes e independientes (Eficiencia Exergética y el Costo de Exergético de Producción de GNC) muestra que existe variación inversa una respecto de otra.
- En el análisis de costos se determina que el costo de materia prima de Gas Natural no es influyente para el análisis de sensibilidad ya que este se ve limitado por el volumen de los contenedores donde serán almacenados, es decir es el mismo para cualquier punto de operación.
- Se concluye también que el punto máximo de operación no es con el motor a plena carga (100%) debido a que la limitante de presión de suministro al predio hace que los 45 bar manométricos sean la máxima carga de entrada posible para el funcionamiento del sistema.
- A menores presiones de suministro los costos de operación se ven incrementados debido a que incrementa el tiempo de funcionamiento por ciclo del equipo, sus costos operativos y de mantenimiento incrementan un 15%.

- En el análisis energético y exergético no se considera los costos de energía reactiva del funcionamiento del motor eléctrico para ventilación. A pesar de esto se concluye que no son influyentes en el resultado ya que sus consumos son mínimos.
- Las transferencias de calor como reservorios de calor en relación con el medio ambiente generan un delta de temperatura que puede ser aprovechados como Exergía disponible. Esta transferencia de calor es básicamente transferencia de calor por convección natural y radiación térmica ya que el calor extraído de las superficies de los radiadores y superficies del motor y del compresor son extraídos por el aire de ventilación de ambos subsistemas.
- La eficiencia energética en comparación con la eficiencia exergética del sistema en ninguna circunstancia determina cual es la disponibilidad máxima aprovechable de cada flujo de calor. Esta diferencia muestra que, según el análisis de primera ley de la termodinámica, la energía se encuentra como recuperable en su totalidad, pero basados en el resultado de balance de Exergía se muestra que la disponibilidad es menor porque si considera las irreversibilidades.
- Para efectos de optimización se concluye que la mayor cantidad de Exergía disponible se encuentra en las corrientes de gases de escape del motor y flujos de ventilación del motor y compresor debido a las diferencias de temperatura del aire de salida y de gases de combustión respectivamente.
- A medida que la presión de entrada disminuya, disminuirá el rendimiento del sistema por lo que se concluye que el elemento determinante en todo el funcionamiento en conjunto como motor compresor es la presión de entrada al sistema de compresión. Esto debido a que a menor presión de entrada decrece la producción de GNC y como consecuencia una menor carga de consumo en el motor de combustión y menos consumo de combustible por unidad de carga, lo que determina rendimiento de este y la disponibilidad de energía útil durante el proceso.
- Para la estimación de la entalpia de los gases de combustión se utiliza la línea base de las pruebas de testeo en fabricación para el caso del motor y se utiliza la

cantidad de energía registrada que es liberada por los gases de combustión a plena carga. A esto se considera adicionalmente que existe una transferencia de energía de la superficie del turbo que se considera como una irreversibilidad pero que incrementa la energía de los gases de combustión debido a que se considera aislado térmicamente el volumen exterior del turbo, lo cual se cumple con el objetivo de identificar claramente los procesos de conversión de energía.

- Las ineficiencias principales en los procesos de la ECGN se reflejan principalmente en la liberación de calor por las superficies de los equipos, ya que estas se pierden totalmente en el medio ambiente sin posibilidad de recuperarse. Por otro lado, el aire que sale por los ductos de ventilación debido a su gran masa conlleva una gran entalpia que puede ser aprovechada para algún proceso de intercambio de calor.



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

### Libros

- Szargut. (2005). The Exergy Method. Boston: WIT PRESS.
- Oliveira (2013). Exergy. London: Springer.
- Dincer y Rosen. (2013). Exergy. Oxford: Elsevier.
- Kotas. (1985). The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. London: Butterwords.
- Cengel. (2015). Thermodynamics an Engineering Approach: McGraw-Hill.
- Martyr. (2012). Engine Testings. Oxford: Elsevier.

### Publicaciones

- Valero. (2006). Fundamentals of Exergy Cost Accounting and Thermoconomics. Journal of Energy Resources Technology, 128, 1-8.
- Valero. (2006). Fundamentals of Exergy Cost Accounting and Thermoconomics. Journal of Energy Resources Technology, 128, 9-14.
- EIA (2017). Panorama Energético Anual con proyecciones al 2050.
- Gharehghani. (2013). Experimental investigation of thermal balance of a turbocharged SI engine operating on natural gas. Applied Thermal Engineering, 60, 200-207.
- Kostowski. (2015). Energy and exergy recovery in a natural gas Compression Station. Journal of Energy Resources Technology, 128, 1-8.
- Rosen, Dincer. (2002). Exergy–cost–energy–mass analysis of thermal systems and processes. Journal of Energy Resources Technology, 128, 9-14.
- Wildi. (2007). Maquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia. Applied Thermal Engineering, 60, 200-207.

APENDICES



**APENDICE 1.1**  
**CALCULOS A 45 BARG**







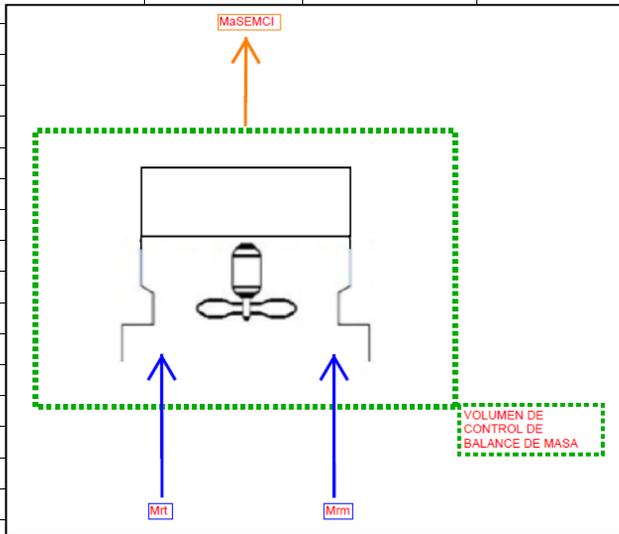


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Sistema de Enfriamiento del MCI

Volumen de Control del SEMCI



Balace de Masa

De la Ley de Conservación de la Masa para un Régimen Estacionario se tiene:

<b>Mart</b>	=	<b>3.696</b>	<b>[kg/s]</b>	<b>MaSEMCI</b>	=	<b>14.786</b>	<b>[kg/s]</b>
<b>Marm</b>	=	<b>11.089</b>	<b>[kg/s]</b>				



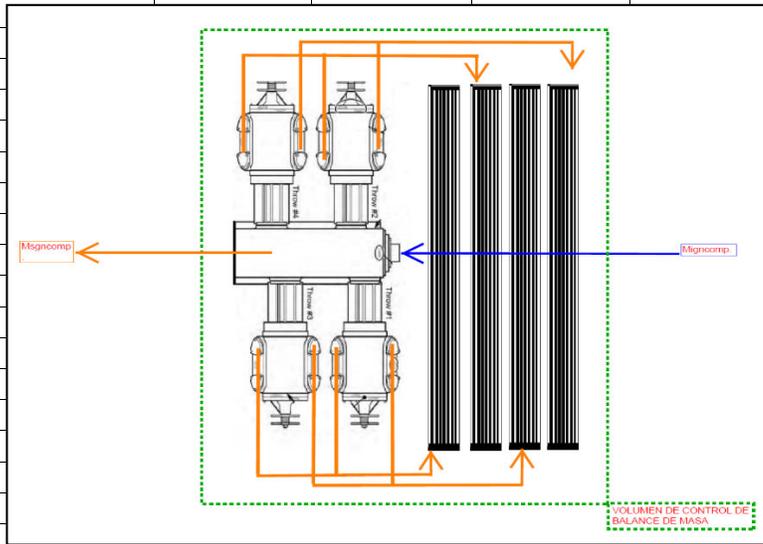


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Volumen de Control del CGN



**Mgncomp.** Masa de Ingreso de Gas Natural de Compresión.

**Mgncomp.** Masa de Salida de Gas Natural de Compresión.



Balance de Masa

De la Ley de Conservación de la Masa para un Régimen Estacionario se tiene:

<b>Mgncomp.</b>	=	<b>0.977</b>	<b>[kg/s]</b>	<b>Mgncomp.</b>	=	<b>0.977</b>	<b>[kg/s]</b>
-----------------	---	--------------	---------------	-----------------	---	--------------	---------------



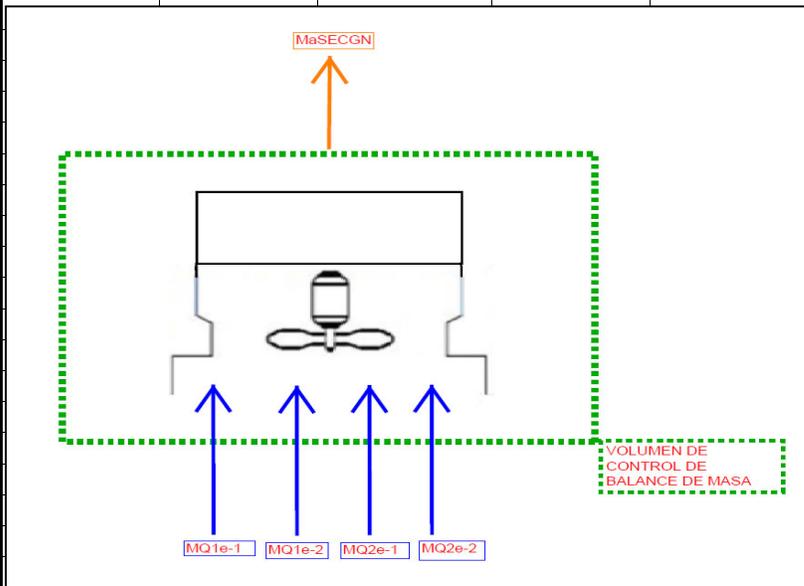


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Cálculo de Masas



Balace de Masa

De la Ley de Conservación de la Masa para un Régimen Estacionario se tiene:

Ma1e-1	=	3.696	[kg/s]		MaSECGN	=	14.786	[kg/s]
Ma1e-2	=	3.696	[kg/s]					
Ma2e-1	=	3.696	[kg/s]					
Ma2e-2	=	3.696	[kg/s]					



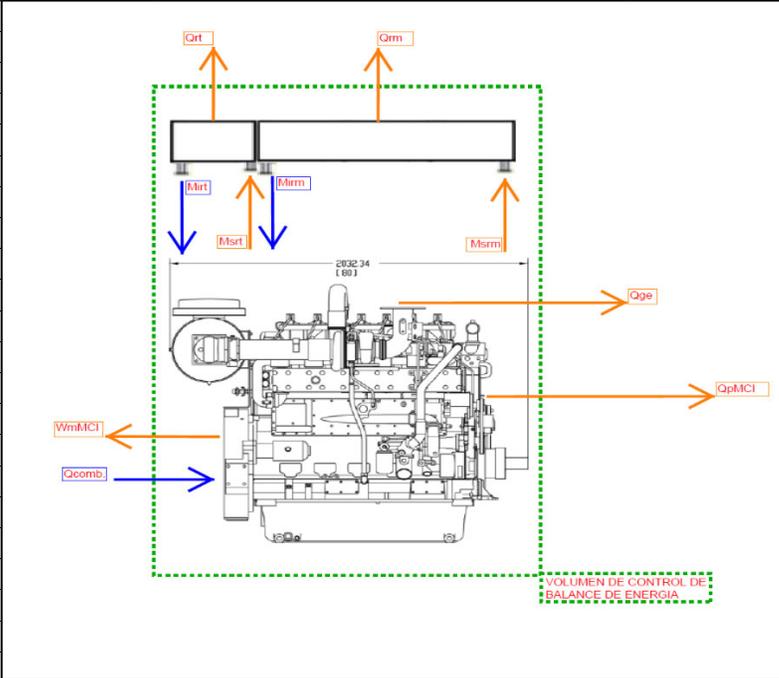


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Motor de Combustión Interna - MCI

Volumen de Control del MCI



<b>Qcomb.</b>	Calor de la Combustión
<b>WmMCI</b>	Potencia Mecánica del MCI
<b>Qge</b>	Calor de los Gases de Escape
<b>Qrt</b>	Calor de Refrigerante del Turbo
<b>Qrm</b>	Calor de Refrigerante del Motor
<b>QpMCI</b>	Calor de Perdidas del MCI

Balance de Energía

De la Ley de Conservación de la Energía para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \sum_{VC} \dot{Q}_{VC} - \sum_{VC} W_{VC} + \sum_{VC} \dot{m}_i \left[ h_i + \frac{1}{2} Vel_i^2 + gZ_i \right] - \sum_{VC} \dot{m}_s \left[ h_s + \frac{1}{2} Vel_s^2 + gZ_s \right]$$

$$\dot{Q}_{comb.} (\dot{Q}_{gncomb.} + \dot{Q}_{oil} + \dot{Q}_{acomb.}) = \dot{W}_{mMCI} + \dot{Q}_{ge} + \dot{Q}_{rt} + \dot{Q}_{rm} + \dot{Q}_{pMCI}$$

<b>Qcomb.</b>	=	942.229	[kW]	<b>WmMCI</b>	=	305.058	[kW]
				<b>Qge</b>	=	262.438	[kW]
				<b>Qrt</b>	=	62.417	[kW]
				<b>Qrm</b>	=	225.699	[kW]
				<b>QpMCI</b>	=	86.617	[kW]



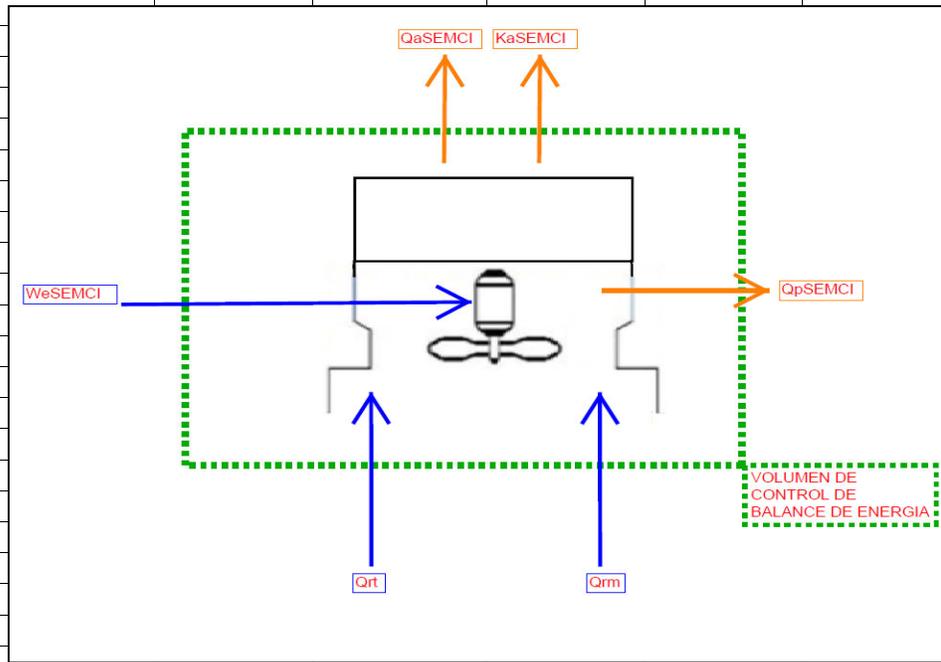


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Sistema de Enfriamiento del MCI

Volumen de Control del SEMCI



Balance de Energía

De la Ley de Conservación de la Energía para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \sum_{VC} \dot{Q}_{VC} - \sum_{VC} W_{VC} + \sum_{VC} \dot{m}_i \left[ h_i + \frac{1}{2} vel_i^2 + gZ_i \right] - \sum_{VC} \dot{m}_s \left[ h_s + \frac{1}{2} vel_s^2 + gZ_s \right]$$

$$\dot{W}_{eSEMCI} + \dot{Q}_{rt} + \dot{Q}_{rm} = \dot{Q}_{aSEMCI} + \dot{K}_{aSEMCI} + \dot{Q}_{pSEMCI}$$

<b>WeSEMCI</b>	=	5.640 [kW]		<b>QaSEMCI</b>	=	269.333 [kW]
----------------	---	------------	--	----------------	---	--------------

<b>Qrt</b>	=	62.417 [kW]		<b>KaSEMCI</b>	=	1.764 [kW]
------------	---	-------------	--	----------------	---	------------

<b>Qrm</b>	=	225.699 [kW]		<b>QpSEMCI</b>	=	22.658 [kW]
------------	---	--------------	--	----------------	---	-------------



# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Sistema de Enfriamiento del MCI

Cálculo de Energía							
<b>WeSEMCI</b>	=	<b>5.640</b>	[kW]	<b>QaSEMCI</b>	=	<b>269.333</b>	[kW]
VlíneaSEMCI	=	220.000	[V]	MaSEMCI	=	14.786	[kg/s]
IlíneaSEMCI	=	20.000	[A]	Cpa	=	1.012	[kJ/kgK]
cos(Ø)	=	0.740	[-]	TiSEMCI	=	298.000	[K]
1W	=	0.001	[kW]	TsSEMCI	=	<b>316.000</b>	[K]
<b>Qrt</b>	=	<b>62.417</b>	[kW]	<b>KaSEMCI</b>	=	<b>1.764</b>	[kW]
				MaSEMCI	=	14.786	[kg/s]
				VELaSEMCI	=	15.446	[m/s]
<b>Qrm</b>	=	<b>225.699</b>	[kW]	VaSEMCI	=	50,000.000	[m3/h]
				DdMCI	=	1.070	[m]
				1 h	=	3,600.000	[s]
				1W	=	0.001	[kW]
				<b>QpSEMCI</b>	=	<b>22.658</b>	[kW]

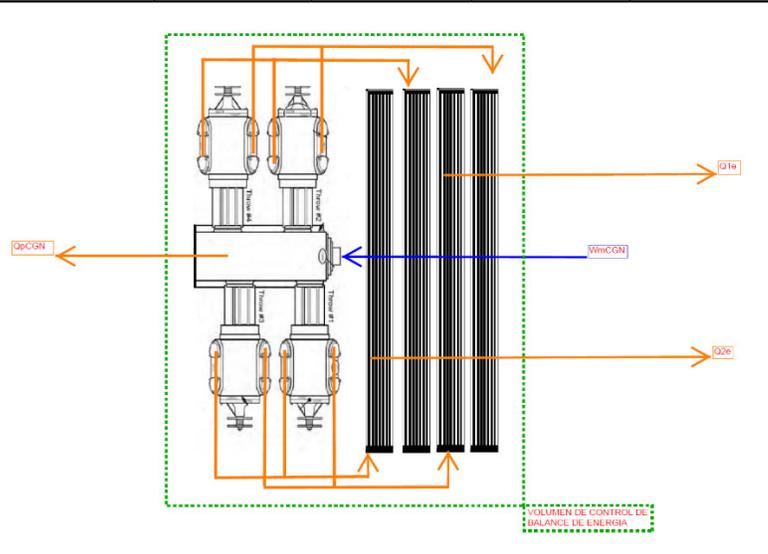


## Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

### Compresor de Gas Natural - CGN

Volumen de Control del CGN



<b>WmCGN</b>	Potencia Mecánica del CGN
<b>Q1e</b>	Calor de Primera Etapa
<b>Q2e</b>	Calor de Segunda Etapa
<b>QpCGN</b>	Calor de Pérdidas de CGN

Balance de Energía

De la Ley de Conservación de la Energía para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\dot{W}_{mCGN} = \dot{Q}_{1e} + \dot{Q}_{2e} + \dot{Q}_{pCGN}$$

<b>WmCGN</b>	=	<b>289.805</b>	<b>[kW]</b>	<b>Q1e</b>	=	<b>112.986</b>	<b>[kW]</b>
				<b>Q2e</b>	=	<b>163.202</b>	<b>[kW]</b>
				<b>QpCGN</b>	=	<b>13.617</b>	<b>[kW]</b>



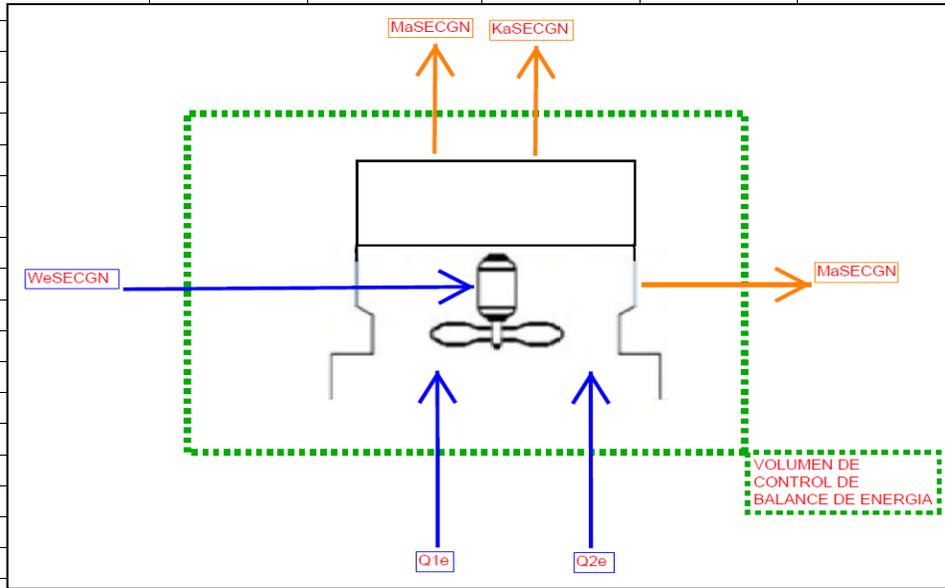


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Cálculo de Energía



$$\dot{W}_{aSECGN} + \dot{Q}_{1e} + \dot{Q}_{2e} = \dot{Q}_{aSECGN} + \dot{K}_{aSECGN} + \dot{Q}_{pSECGN}$$

W <sub>aSECGN</sub>	=	5.640	[kW]	Q <sub>aSECGN</sub>	=	269.333	[kW]
Q <sub>1e</sub>	=	112.986	[kW]	K <sub>aSECGN</sub>	=	1.764	[kW]
Q <sub>2e</sub>	=	163.202	[kW]	Q <sub>pSECGN</sub>	=	10.732	[kW]



# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Cálculo de Energía							
<b>WaSECGN</b>	=	<b>5.640</b>	[kW]	<b>QaSECGN</b>	=	<b>269.333</b>	[kW]
VlíneaSECGN	=	220.000	[V]	MaSECGN	=	14.786	[kg/s]
IlíneaSECGN	=	20.000	[A]	Cpa	=	1.012	[kJ/kgK]
cos(Ø)	=	0.740	[ ]	TiaSECGN	=	298.000	[K]
1W	=	0.001	[kW]	TsaSECGN	=	316.000	[K]
<b>Q1e</b>	=	<b>112.986</b>	[kW]	<b>KaSECGN</b>	=	<b>1.764</b>	[kW]
				MaSECGN	=	14.786	[kg/s]
				VELaSECGN	=	15.446	[m/s]
<b>Q2e</b>	=	<b>163.202</b>	[kW]	VaSECGN	=	50,000.000	[Sm <sup>3</sup> /h]
				DdCGN	=	1.070	[m]
				1 h	=	3,600.000	[s]
				1W	=	0.001	[kW]
				<b>QpSECGN</b>	=	<b>10.732</b>	[kW]

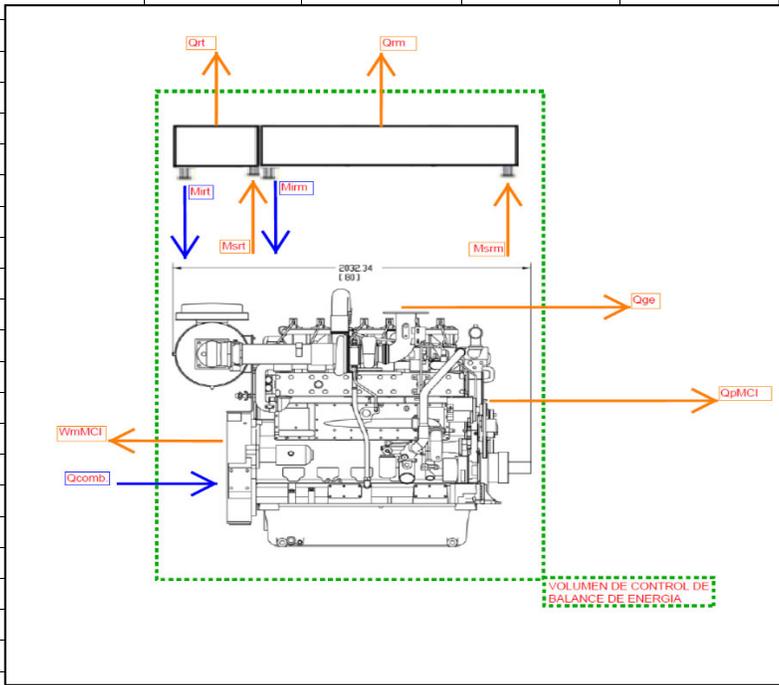


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Motor de Combustión Interna - CGN

Volumen de Control del CGN



Balace de Exergía

Haciendo un balance de Exergía para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\frac{d\dot{B}}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{VC} + \sum_i \dot{m}_i (h_i - T_o s_i) - \sum_s \dot{m}_s (h_s - T_o s_s) - T_o S_{ger}$$

XQncomb.	=	979.918	[kW]		=	305.058	[kW]
						111.110	[kW]
						1.826	[kW]
						6.604	[kW]
						5.448	[kW]
						549.871	[kW]



## Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

Motor de Combustión Interna - CGN							
Cálculo de Exergía							
<b>XQgncomb.</b>	=	<b>979.918</b>	<b>[kW]</b>	<b>XWmMCI</b>	=	<b>305.058</b>	<b>[kW]</b>
Mgncomb.	=	0.019	[kg/s]				
φgn	=	1.040	[]				
NHVng	=	48,365.000	[kJ/kg]				
<b>XQacomb.</b>	=	<b>-</b>	<b>[kW]</b>	<b>XQge</b>	=	<b>111.110</b>	<b>[kW]</b>
				Qge	=	262.438	[kW]
				Mge	=	0.791	[kg/s]
<b>Xqoil</b>	=		<b>[kW]</b>	To	=	298.000	[K]
				Cpge	=	0.632	[kJ/kgK]
				Tige	=	823.000	[K]
				R	=	0.287	[kJ/kgK]
				Po	=	1.000	[barg]
				Pge	=	1.000	[barg]
				<b>XQrt</b>	=	<b>1.826</b>	<b>[kW]</b>
				Qrt	=	62.417	[kW]
				Mirt	=	2.229	[kg/s]
				Cpr	=	3.500	[kJ/kg-K]
				To	=	298.000	[K]
				Tsrt	=	311.000	[K]
				Tirt	=	303.000	[K]
				<b>XQrm</b>	=	<b>6.604</b>	<b>[kW]</b>
				Qrm	=	225.699	[kW]
				Mirm	=	8.061	[kg/s]
				Cpr	=	3.500	[kJ/kg-K]
				To	=	298.000	[K]
				Tsrm	=	311.000	[K]
				Tirm	=	303.000	[K]
				<b>XQpMCI</b>	=	<b>5.448</b>	<b>[kW]</b>
				To	=	298.000	[K]
				TpMCI	=	318.000	[K]
				QpMCI	=	86.617	[kW]
				<b>XdMCI</b>	=	<b>549.871</b>	<b>[kW]</b>

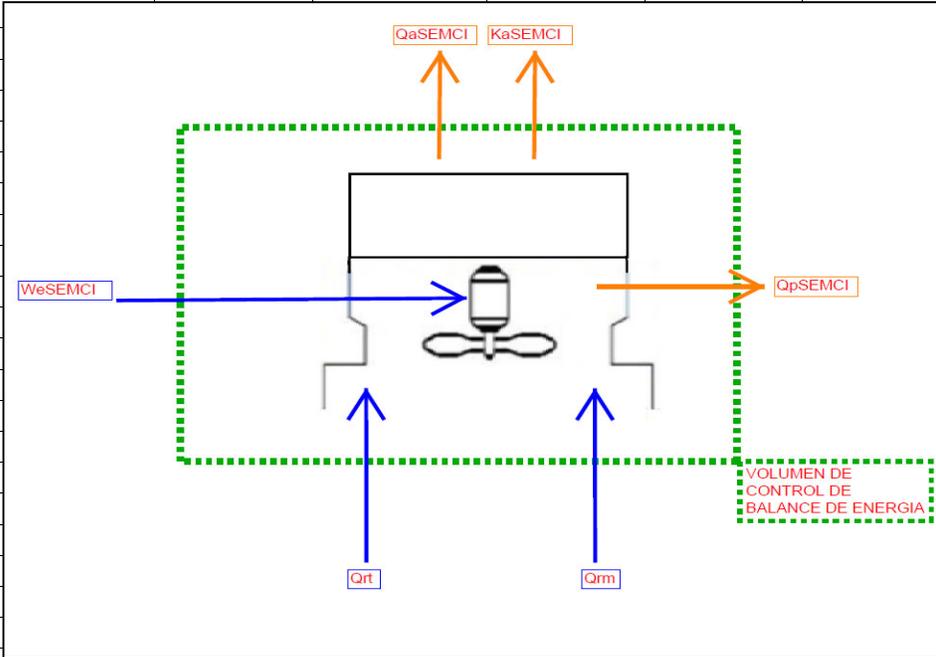


## Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

### Motor de Combustión Interna - CGN

Cálculo de Exergía



Balace de Exergía

Haciendo un balace de Exergía para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\bullet \dot{X}_{W_{aSEMCI}} + \dot{X}_{Q_{rt}} + \dot{X}_{Q_{rm}} = \dot{X}_{Q_{aSEMCI}} + \dot{X}_{K_{aSEMCI}} + \dot{X}_{Q_{pSEMCI}} + \dot{X}_{dSEMCI}$$

XW <sub>aSEMCI</sub>	=	5.640 [kW]		XQ <sub>aSEMCI</sub>	=	7.821 [kW]
XQ <sub>rt</sub>	=	1.826 [kW]		XK <sub>aSEMCI</sub>	=	1.764 [kW]
XQ <sub>rm</sub>	=	6.604 [kW]		XQ <sub>pSEMCI</sub>	=	1.425 [kW]
				X <sub>dSEMCI</sub>	=	3.061 [kW]



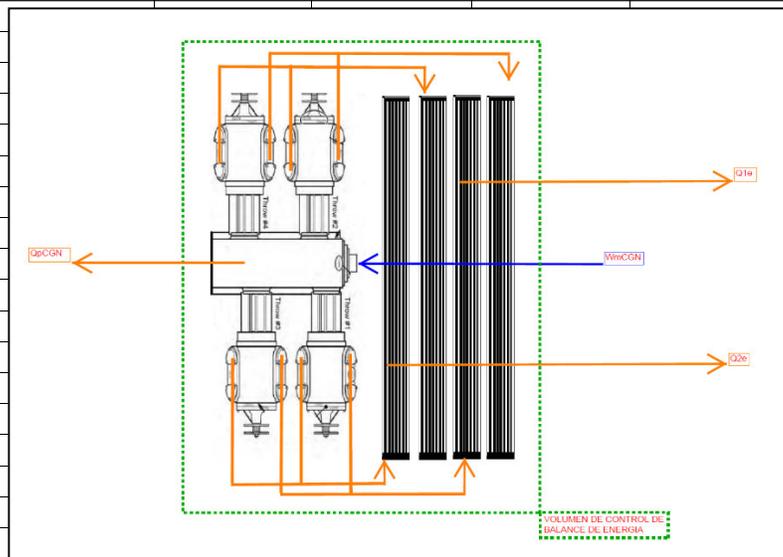


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
 Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
 Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Volumen de Control del CGN



Balance de Exergía

De la Ley de Conservación de la Energía para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\bullet \dot{X}_{W_{mCGN}} = \dot{X}_{Q_{1e}} + \dot{X}_{Q_{2e}} + \dot{X}_{Q_{pCGN}} + \dot{X}_{dCGN}$$

XWmCGN	=	289.805	[kW]	XQ1e	=	14.103	[kW]
				XQ2e	=	24.445	[kW]
				XQpGN	=	0.856	[kW]
				XdCGN	=	250.401	[kW]



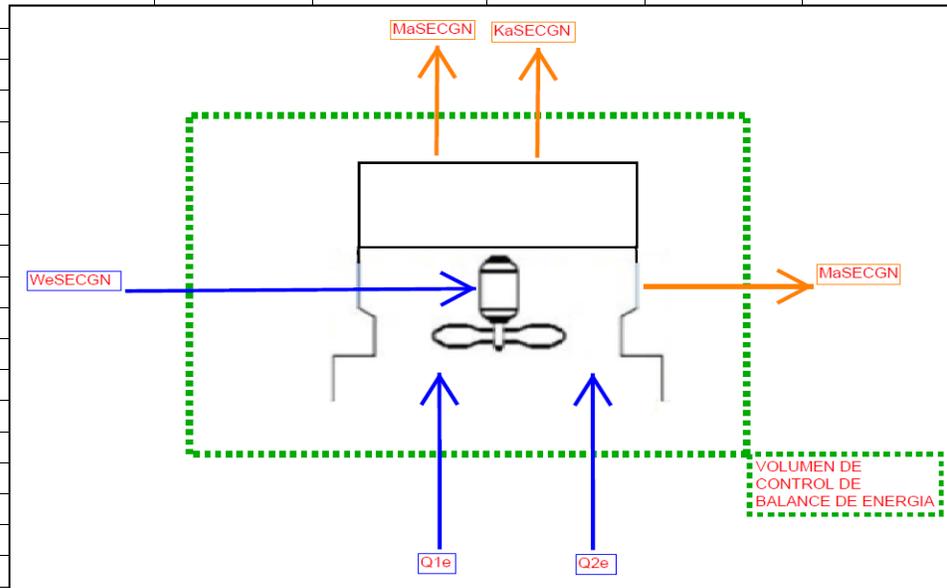


## Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

Compresor de Gas Natural - CGN

Cálculo de Exergía



$$\bullet \dot{X}_{W_{aSECGN}} + \dot{X}_{Q_{1e}} + \dot{X}_{Q_{2e}} = \dot{X}_{Q_{aSECGN}} + \dot{X}_{k_{aSECGN}} + \dot{X}_{Q_{pSECGN}} + \dot{X}_{dSECGN}$$

$X_{W_{aSECGN}}$	=	5.640 [kW]	$X_{Q_{aSECGN}}$	=	7.821 [kW]
------------------	---	------------	------------------	---	------------

$X_{Q_{1e}}$	=	14.103 [kW]	$X_{K_{aSECGN}}$	=	1.764 [kW]
--------------	---	-------------	------------------	---	------------

$X_{Q_{2e}}$	=	24.445 [kW]	$X_{Q_{pSECGN}}$	=	0.675 [kW]
--------------	---	-------------	------------------	---	------------

			$X_{dSECGN}$	=	33.928 [kW]
--	--	--	--------------	---	-------------



# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Cálculo de Exergía							
<b>XWaSECGN</b>	=	<b>5.640</b>	[kW]	<b>XQaSECGN</b>	=	<b>7.821</b>	[kW]
				QaSECGN	=	269.333	[kW]
				MaSECGN	=	14.786	[kg/s]
<b>XQ1e</b>	=	<b>14.103</b>	[kW]	To	=	298.000	[K]
				Cpa	=	1.012	[kJ/kgK]
				TsaSECGN	=	316.000	[K]
<b>XQ2e</b>	=	<b>24.445</b>	[kW]	R	=	0.287	[kJ/kgK]
				Po	=	1.000	[barg]
				PaSECGN	=	1.000	[barg]
				<b>XKaSECGN</b>	=	<b>1.764</b>	[kW]
				<b>XQpSECGN</b>	=	<b>0.675</b>	[kW]
				To	=	298.000	[K]
				TQpSECGN	=	318.000	[K]
				QpSECGN	=	10.732	[kW]
				<b>XdSECGN</b>	=	<b>33.928</b>	[kW]

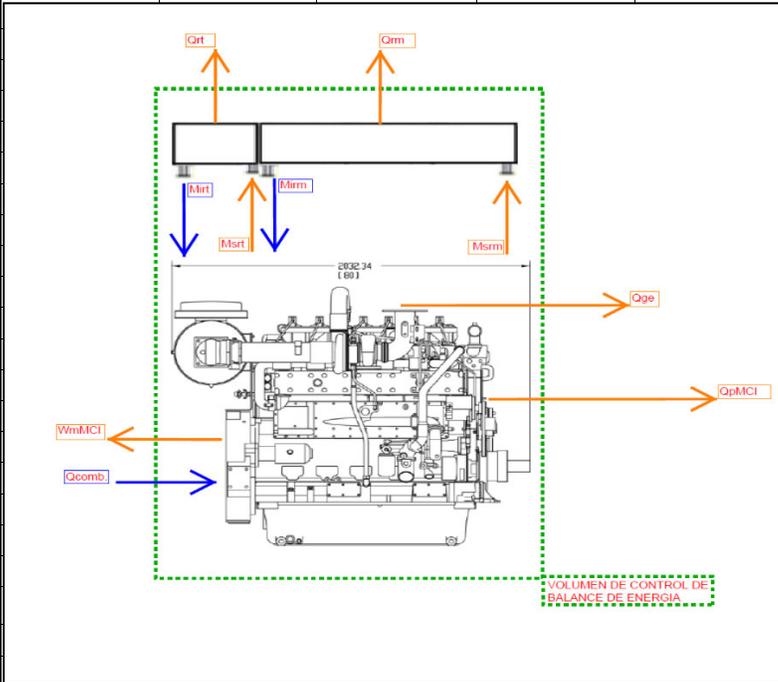


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Motor de Combustión Interna - CGN

### Volumen de Control del CGN



### Balance de Costos

Haciendo un balance de Costos para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\dot{C}_{\dot{Q}_{gncomb.}} + \dot{C}_{MCI} + \dot{C}_{o\&mMCI} = \dot{C}_{\dot{W}_{mMCI}} + \dot{C}_{\dot{Q}_{ge}} + \dot{C}_{\dot{Q}_{rt}} + \dot{C}_{\dot{Q}_{rm}} + \dot{C}_{\dot{Q}_{pMCI}} + \dot{C}_{\dot{W}_{dMCI}}$$

<b>CXQgncomb.</b>	=	<b>32.006</b>	[\$/ciclo]			
<b>CMCI</b>	=	<b>3.699</b>	[\$/ciclo]	<b>CXWmMCI</b>	=	<b>9.964</b> [\$/ciclo]
<b>Co&amp;mMCI</b>	=	<b>1.667</b>	[\$/ciclo]	<b>CXQge</b>	=	<b>3.629</b> [\$/ciclo]
				<b>CXQrt</b>	=	<b>0.060</b> [\$/ciclo]
				<b>CXQrm</b>	=	<b>0.216</b> [\$/ciclo]
				<b>CXQpMCI</b>	=	<b>0.178</b> [\$/ciclo]
				<b>CXdMCI</b>	=	<b>23.325</b> [\$/ciclo]



## Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

Motor de Combustión Interna - CGN							
Cálculo de Costos							
<b>CXQgncomb.</b>	=	<b>32.006</b>	<b>[\$/ciclo]</b>		<b>CXWmMCI</b>	=	<b>9.964</b> <b>[\$/ciclo]</b>
XQgncomb.	=	979.918	[kW]		Cgn(KJ)	=	0.000 [\$/kJ]
Tiempo llenado	=	5,316.456	[s/ciclo]		XWmMCI	=	305.058 [kW]
Cgn(KJ)	=	6.14E-06	[\$/kJ]		Tiempo llenado	=	5,316.456 [s/ciclo]
<b>CMCI</b>	=	<b>3.699</b>	<b>[\$/ciclo]</b>		<b>CXQge</b>	=	<b>3.629</b> <b>[\$/ciclo]</b>
CAPEX	=	135.000.000	[\$/unidad]		Cgn(KJ)	=	0.000 [\$/kJ]
TVU	=	10.000	[a]		XQge	=	111.110 [kW]
Ciclos anuales	=	3,650.000	[ciclo/a]		Tiempo llenado	=	5,316.456 [s/ciclo]
Ciclos dia	=	10.000	[ciclo/d]				
1 año	=	365.000	[d]				
					<b>CXQrt</b>	=	<b>0.060</b> <b>[\$/ciclo]</b>
					Cgn(KJ)	=	0.000 [\$/kJ]
<b>Co&amp;mMCI</b>	=	<b>1.667</b>	<b>[\$/ciclo]</b>		XQrt	=	1.826 [kW]
					Tiempo llenado	=	5,316.456 [s/ciclo]
					<b>CXQrm</b>	=	<b>0.216</b> <b>[\$/ciclo]</b>
					Cgn(KJ)	=	0.000 [\$/kJ]
					XQrm	=	6.604 [kW]
					Tiempo llenado	=	5,316.456 [s/ciclo]
					<b>CXQpMCI</b>	=	<b>0.178</b> <b>[\$/ciclo]</b>
					Cgn(KJ)	=	0.000 [\$/kJ]
					XQpMCI	=	5.448 [kW]
					Tiempo llenado	=	5,316.456 [s/ciclo]
					<b>CXdMCI</b>	=	<b>23.325</b> <b>[\$/ciclo]</b>
Cgn(KJ)	=	6.14E-06	[\$/kJ]				
Cgn(GJ)	=	6.144	[\$/GJ]				
Cgn(Sm3)	=	0.245	[\$/Sm3]				
PCSCalidda	=	0.040	[GJ/Sm3]				
CEE(kW-s)	=	1.98E-05	[\$./kW-s]				
CEE(kW-H)	=	0.071	[\$./kW-h]				
	Presión de Suministro	Rendimiento	Capacidad de Contenedor	Tiempo por Ciclo	Tiempo por Ciclo	Mantenimiento	
ITEM	[barg]	[Sm3/h]	[Sm3]	[h]	[s]	USD \$/ciclo	
1.000	45.000	4,740.000	7,000.000	1.477	5,316.456	1.667	
2.000	40.000	4,089.000	7,000.000	1.712	6,162.876	1.917	
3.000	35.000	3,455.000	7,000.000	2.026	7,293.777	2.204	
Mant.	USD\$/mes	500.000	575.000	661.250			
	USD\$/dia	16.667	19.167	22.042			
	USD\$/ciclo	1.667	1.917	2.204			

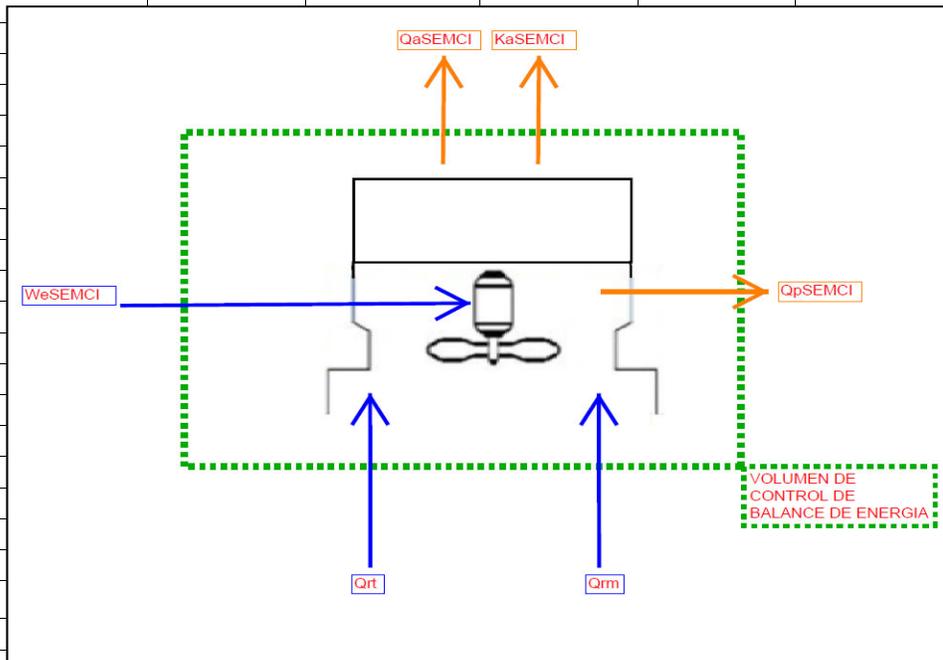


## Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

Motor de Combustión Interna - CGN

Cálculo de Costos



Balance de Costos

Haciendo un balance de Costos para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\dot{C}_{\dot{x}_{W_{aSEMCI}}} + \dot{C}_{SEMCI} + \dot{C}_{o\&m_{SEMCI}} + \dot{C}_{\dot{x}_{Q_{rt}}} + \dot{C}_{\dot{x}_{Q_{rm}}} = \dot{C}_{\dot{x}_{Q_{aSEMCI}}} + \dot{C}_{\dot{x}_{k_{aSEMCI}}} + \dot{C}_{\dot{x}_{Q_{pSEMCI}}} + \dot{C}_{\dot{x}_{dSEMCI}}$$

$CX_{W_{aSEMCI}}$	=	0.595	[\$/ciclo]	$CX_{Q_{aSEMCI}}$	=	0.255	[\$/ciclo]
-------------------	---	-------	------------	-------------------	---	-------	------------

$C_{SEMCI}$	=	2.466	[\$/ciclo]	$CX_{k_{aSEMCI}}$	=	0.186	[\$/ciclo]
-------------	---	-------	------------	-------------------	---	-------	------------

$CX_{Q_{rt}}$	=	0.060	[\$/ciclo]	$CX_{Q_{pSEMCI}}$	=	0.047	[\$/ciclo]
---------------	---	-------	------------	-------------------	---	-------	------------

$CX_{Q_{rm}}$	=	0.216	[\$/ciclo]	$CX_{dSEMCI}$	=	3.681	[\$/ciclo]
---------------	---	-------	------------	---------------	---	-------	------------

$C_{o\&m_{SEMCI}}$	=	0.833	[\$/ciclo]				
--------------------	---	-------	------------	--	--	--	--



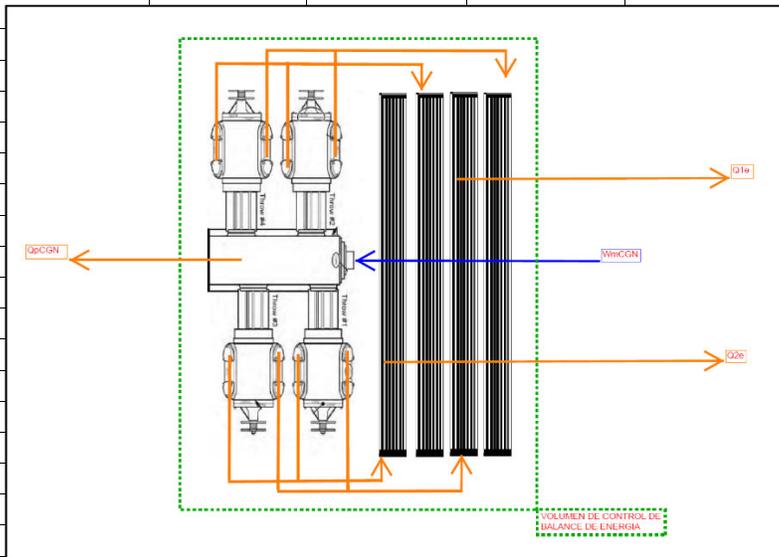


## Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

### Compresor de Gas Natural - CGN

Volumen de Control del CGN



Balance de Costos

De la Ley de Conservación de la Energía para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\bullet \dot{C}_{\dot{X}_{W_{mCGN}}} + \dot{C}_{CGN} + \dot{C}_{O\&m_{CGN}} = \dot{C}_{\dot{X}_{Q_{1e}}} + \dot{C}_{\dot{X}_{Q_{2e}}} + \dot{C}_{\dot{X}_{Q_{pCGN}}} + \dot{C}_{\dot{X}_{dCGN}}$$

$CX_{W_{mCGN}}$	=	9.466	[\$/ciclo]	$CX_{Q_{1e}}$	=	0.461	[\$/Ciclo]
-----------------	---	-------	------------	---------------	---	-------	------------

$CC_{GN}$	=	3.699	[\$/ciclo]	$CX_{Q_{2e}}$	=	0.798	[\$/Ciclo]
-----------	---	-------	------------	---------------	---	-------	------------

$Co\&m_{CGN}$	=	1.667	[\$/Ciclo]	$CX_{Q_{pCGN}}$	=	0.028	[\$/Ciclo]
---------------	---	-------	------------	-----------------	---	-------	------------

				$CX_{dCGN}$	=	13.544	[\$/Ciclo]
--	--	--	--	-------------	---	--------	------------



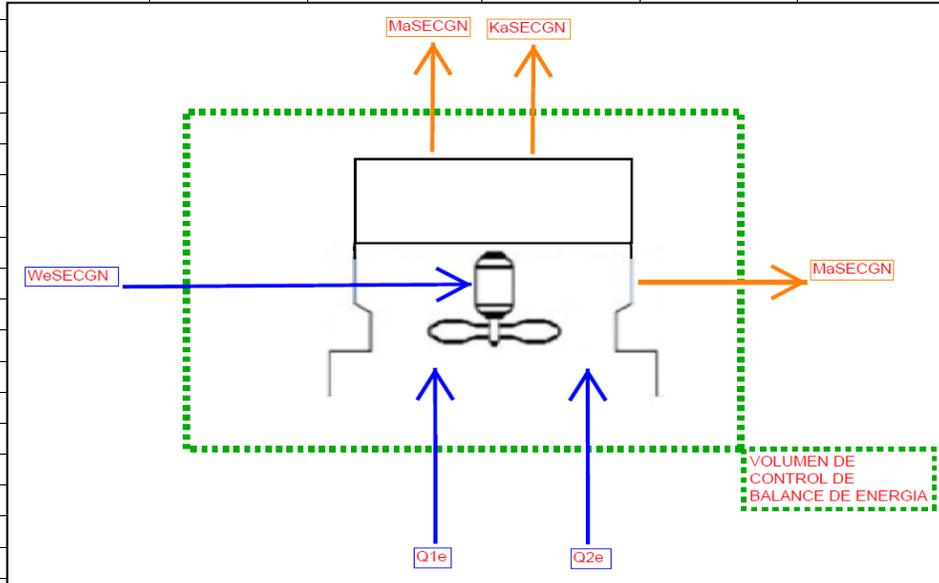


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Cálculo de Costos



$$\dot{C}_{\dot{X}W_{mSECGN}} + \dot{C}_{SECGN} + \dot{C}_{o\&mSECGN} + \dot{C}_{\dot{X}Q_{1e}} + \dot{C}_{\dot{X}Q_{2e}} = \dot{C}_{\dot{X}Q_{aSECGN}} + \dot{C}_{\dot{X}k_{aSECGN}} + \dot{C}_{\dot{X}Q_{pSECGN}} + \dot{C}_{\dot{X}dSECGN}$$

CXWaSECGN	=	0.595	[\$/ciclo]		CXQaSECGN	=	0.255	[\$/ciclo]
CSECGN	=	2.466	[\$/ciclo]		CXKaSECGN	=	0.186	[\$/ciclo]
CXQ1e	=	0.461	[\$/Ciclo]		CXQpSECGN	=	0.022	[\$/ciclo]
CXQ2e	=	0.798	[\$/Ciclo]		CXdSECGN	=	4.689	[\$/ciclo]
Co&mSECGN	=	0.833	[\$/ciclo]					





**APENDICE 1.2**  
**CALCULOS A 40 BARG**



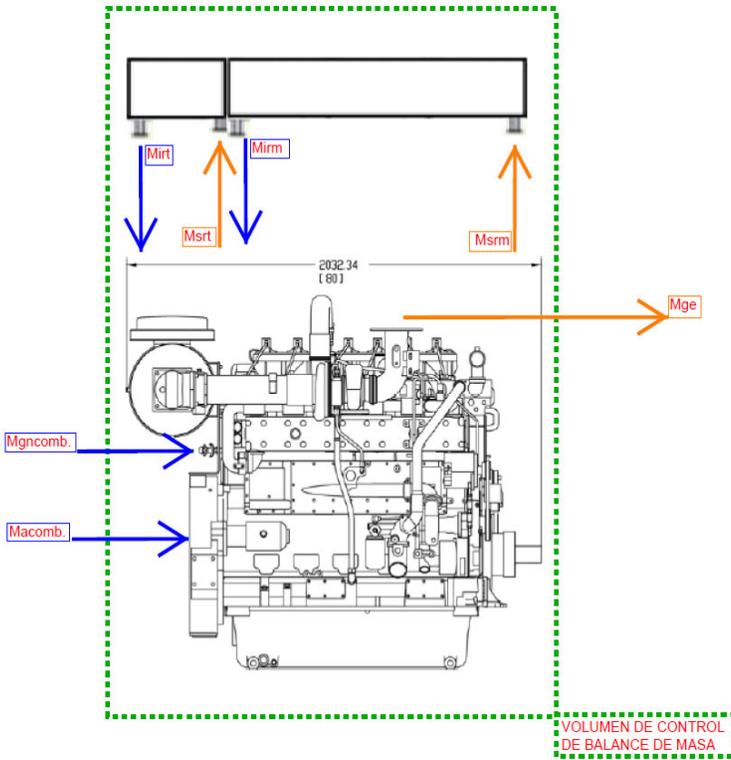


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Motor de Combustión Interna - MCI

Volumen de Control del MCI



<b>Mgncomb.</b>	Masa de Gas Natural Combustible
<b>Macomb.</b>	Masa de Aire Combustible
<b>Mge</b>	Masa de Salida de Gases de Escape
<b>Mirt</b>	Masa de Ingreso de Refrigerante del Turbo
<b>Msrt</b>	Masa de Salida del Refrigerante del Turbo
<b>Mirm</b>	Masa de Ingreso de Refrigerante del Motor
<b>Msrm</b>	Masa de Salida de Refrigerante del Motor



Balance de Masa

De la Ley de Conservación de la Masa para un Régimen Estacionario se tiene:

<b>Mgncomb.</b>	=	<b>0.018</b>	<b>[kg/s]</b>	<b>Mge</b>	=	<b>0.740</b>	<b>[kg/s]</b>
<b>Macomb.</b>	=	<b>0.722</b>	<b>[kg/s]</b>				
<b>Mirt</b>	=	<b>2.229</b>	<b>[kg/s]</b>	<b>Msrt</b>	=	<b>2.229</b>	<b>[kg/s]</b>
<b>Mirm</b>	=	<b>8.061</b>	<b>[kg/s]</b>	<b>Msrm</b>	=	<b>8.061</b>	<b>[kg/s]</b>



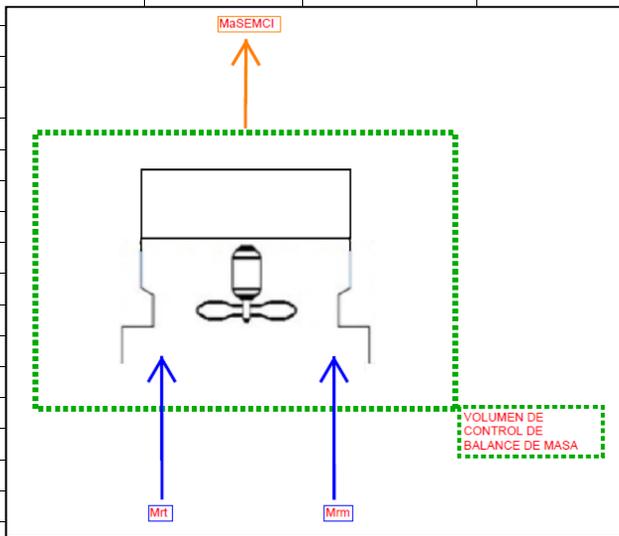


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Sistema de Enfriamiento del MCI

Volumen de Control del SEMCI



Balace de Masa

De la Ley de Conservación de la Masa para un Régimen Estacionario se tiene:

<b>Mart</b>	=	<b>3.696</b>	<b>[kg/s]</b>	<b>MaSEMCI</b>	=	<b>14.786</b>	<b>[kg/s]</b>
<b>Marm</b>	=	<b>11.089</b>	<b>[kg/s]</b>				



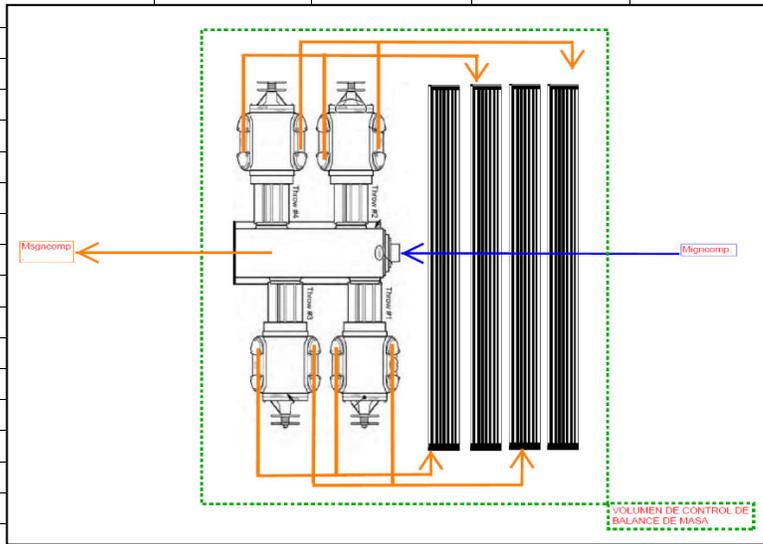


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Volumen de Control del CGN



**Mgncomp.** Masa de Ingreso de Gas Natural de Compresión.

**Mgncomp.** Masa de Salida de Gas Natural de Compresión.



Balance de Masa

De la Ley de Conservación de la Masa para un Régimen Estacionario se tiene:

<b>Mgncomp.</b>	=	<b>0.843</b>	<b>[kg/s]</b>	<b>Mgncomp.</b>	=	<b>0.843</b>	<b>[kg/s]</b>
-----------------	---	--------------	---------------	-----------------	---	--------------	---------------



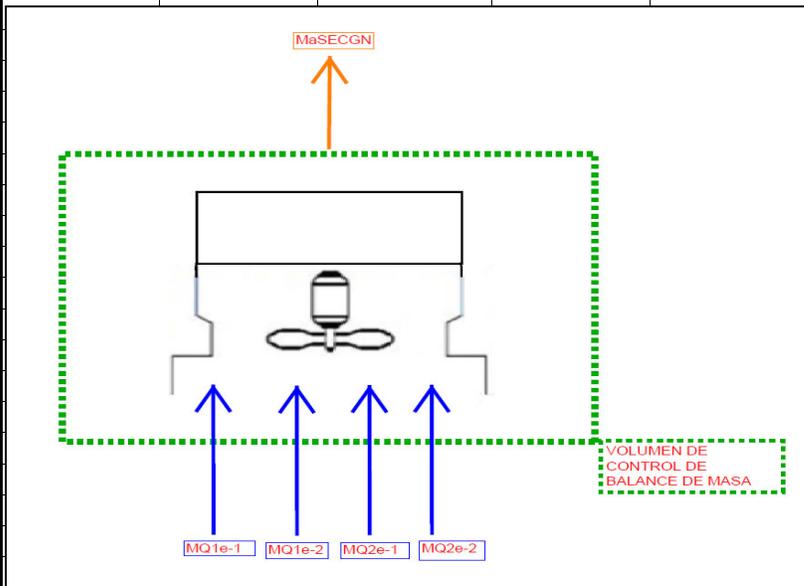


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Cálculo de Masas



Balace de Masa

De la Ley de Conservación de la Masa para un Régimen Estacionario se tiene:

Ma1e-1	=	3.696	[kg/s]		MaSECGN	=	14.786	[kg/s]
Ma1e-2	=	3.696	[kg/s]					
Ma2e-1	=	3.696	[kg/s]					
Ma2e-2	=	3.696	[kg/s]					



## Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

### Compresor de Gas Natural - CGN

Compresor de Gas Natural - CGN							
Cálculo de Masas							
VaSECGN	=	50,000.000	[Sm <sup>3</sup> /h]				
<b>Ma1e-1</b>	=	<b>3.696</b>	<b>[kg/s]</b>	<b>MaSECGN</b>	=	<b>14.786</b>	<b>[kg/s]</b>
Va1e	=	12,500.000	[m <sup>3</sup> /h]	Ma1e-1	=	3.696	[kg/s]
paire	=	0.066	[lb/ft <sup>3</sup> ]	Ma1e-2	=	3.696	[kg/s]
1lb/ft <sup>3</sup>	=	16.018	[kg/m <sup>3</sup> ]	Ma2e-1	=	3.696	[kg/s]
1 h	=	3,600.000	[s]	Ma2e-2	=	3.696	[kg/s]
<b>Ma1e-2</b>	=	<b>3.696</b>	<b>[kg/s]</b>				
Va1e	=	12,500.000	[m <sup>3</sup> /h]				
paire	=	0.066	[lb/ft <sup>3</sup> ]				
1lb/ft <sup>3</sup>	=	16.018	[kg/m <sup>3</sup> ]				
1 h	=	3,600.000	[s]				
<b>Ma2e-1</b>	=	<b>3.696</b>	<b>[kg/s]</b>				
Va2e	=	12,500.000	[m <sup>3</sup> /h]				
paire	=	0.066	[lb/ft <sup>3</sup> ]				
1lb/ft <sup>3</sup>	=	16.018	[kg/m <sup>3</sup> ]				
1 h	=	3,600.000	[s]				
<b>Ma2e-2</b>	=	<b>3.696</b>	<b>[kg/s]</b>				
Va2e	=	12,500.000	[m <sup>3</sup> /h]				
paire	=	0.066	[lb/ft <sup>3</sup> ]				
1lb/ft <sup>3</sup>	=	16.018	[kg/m <sup>3</sup> ]				
1 h	=	3,600.000	[s]				

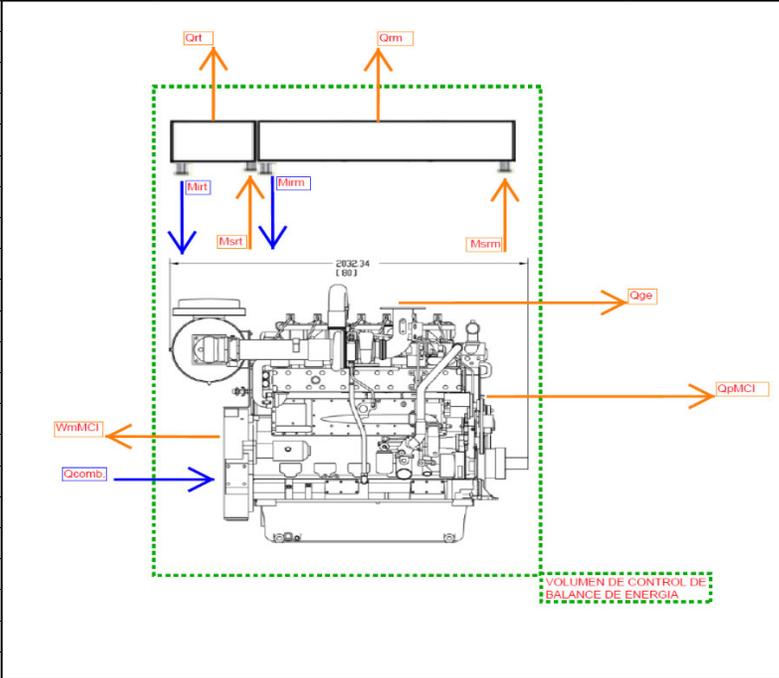


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Motor de Combustión Interna - MCI

Volumen de Control del MCI



<b>Qcomb.</b>	Calor de la Combustión
<b>WmMCI</b>	Potencia Mecánica del MCI
<b>Qge</b>	Calor de los Gases de Escape
<b>Qrt</b>	Calor de Refrigerante del Turbo
<b>Qrm</b>	Calor de Refrigerante del Motor
<b>QpMCI</b>	Calor de Perdidas del MCI

Balance de Energía

De la Ley de Conservación de la Energía para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \sum_{VC} \dot{Q}_{VC} - \sum_{VC} W_{VC} + \sum_{VC} \dot{m}_i \left[ h_i + \frac{1}{2} Vel_i^2 + gZ_i \right] - \sum_{VC} \dot{m}_s \left[ h_s + \frac{1}{2} Vel_s^2 + gZ_s \right]$$

$$\dot{Q}_{comb} \cdot (\dot{Q}_{gncomb} + \dot{Q}_{oil} + \dot{Q}_{acomb}) = \dot{W}_{mMCI} + \dot{Q}_{ge} + \dot{Q}_{rt} + \dot{Q}_{rm} + \dot{Q}_{pMCI}$$

<b>Qcomb.</b>	=	<b>882.078</b>	<b>[kW]</b>	<b>WmMCI</b>	=	<b>283.884</b>	<b>[kW]</b>
				<b>Qge</b>	=	<b>222.286</b>	<b>[kW]</b>
				<b>Qrt</b>	=	<b>46.813</b>	<b>[kW]</b>
				<b>Qrm</b>	=	<b>169.274</b>	<b>[kW]</b>
				<b>QpMCI</b>	=	<b>159.821</b>	<b>[kW]</b>



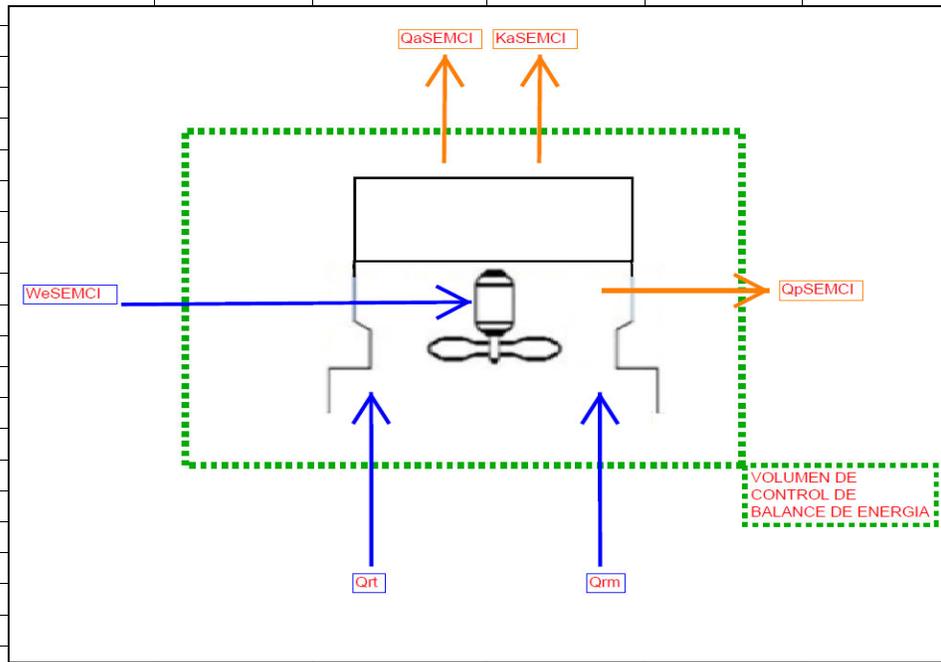


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

Sistema de Enfriamiento del MCI

Volumen de Control del SEMCI



Balance de Energía

De la Ley de Conservación de la Energía para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \sum_{VC} \dot{Q}_{VC} - \sum_{VC} W_{VC} + \sum_{VC} \dot{m}_i \left[ h_i + \frac{1}{2} vel_i^2 + gZ_i \right] - \sum_{VC} \dot{m}_s \left[ h_s + \frac{1}{2} vel_s^2 + gZ_s \right]$$

$$\dot{W}_{eSEMCI} + \dot{Q}_{rt} + \dot{Q}_{rm} = \dot{Q}_{aSEMCI} + \dot{K}_{aSEMCI} + \dot{Q}_{pSEMCI}$$

<b>WeSEMCI</b>	=	5.640	[kW]	<b>QaSEMCI</b>	=	209.481	[kW]
<b>Qrt</b>	=	46.813	[kW]	<b>KaSEMCI</b>	=	1.764	[kW]
<b>Qrm</b>	=	169.274	[kW]	<b>QpSEMCI</b>	=	10.481	[kW]



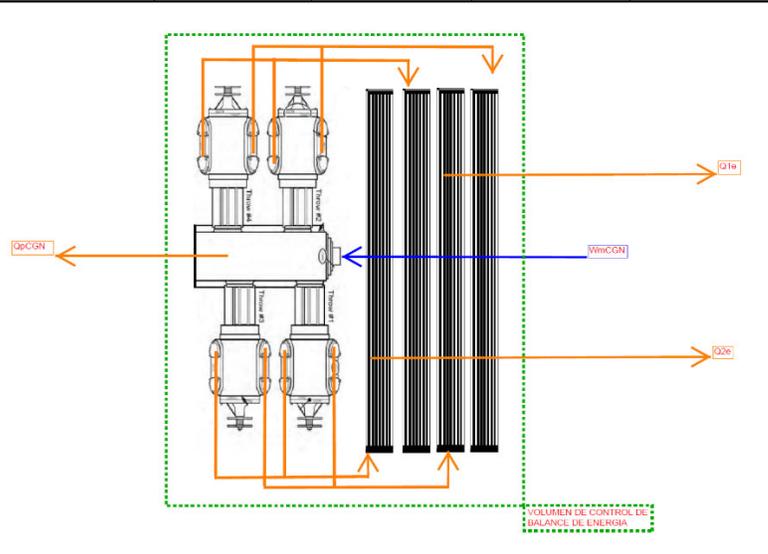


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Volumen de Control del CGN



<b>WmCGN</b>	Potencia Mecánica del CGN
<b>Q1e</b>	Calor de Primera Etapa
<b>Q2e</b>	Calor de Segunda Etapa
<b>QpCGN</b>	Calor de Pérdidas de CGN

Balance de Energía

De la Ley de Conservación de la Energía para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\dot{W}_{mCGN} = \dot{Q}_{1e} + \dot{Q}_{2e} + \dot{Q}_{pCGN}$$

<b>WmCGN</b>	=	<b>269.690</b>	<b>[kW]</b>	<b>Q1e</b>	=	<b>97.468</b>	<b>[kW]</b>
				<b>Q2e</b>	=	<b>140.788</b>	<b>[kW]</b>
				<b>QpCGN</b>	=	<b>31.434</b>	<b>[kW]</b>



# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Cálculo de Energía							
<b>WmCGN</b>	=	<b>269.690</b>	<b>[kW]</b>	<b>Q1e</b>	=	<b>97.468</b>	<b>[kW]</b>
WmCGN	=	362.000	[hp]	Migncomp.	=	0.843	[kg/s]
lhp	=	0.745	[kW]	Cpgn	=	2.570	[kJ/kgK]
				Ti1e	=	318.000	[K]
				Ts1e	=	363.000	[K]
				<b>Q2e</b>	=	<b>140.788</b>	<b>[kW]</b>
				Migncomp.	=	0.843	[kg/s]
				Cpgn	=	2.570	[kJ/kgK]
				Ti2e	=	318.000	[K]
				Ts2e	=	383.000	[K]
				<b>QpCGN</b>	=	<b>31.434</b>	<b>[kW]</b>

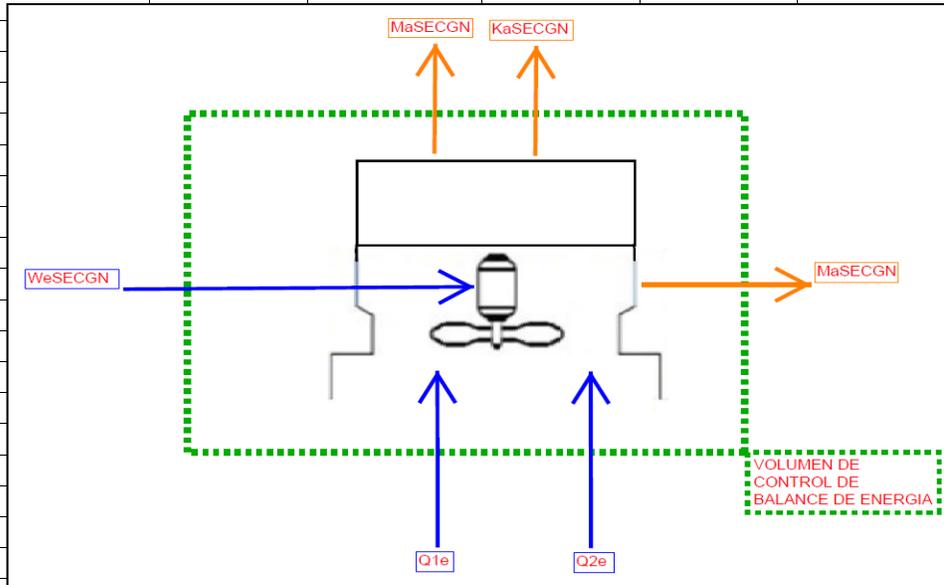


## Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

### Compresor de Gas Natural - CGN

Cálculo de Energía



$$\dot{W}_{aSECGN} + \dot{Q}_{1e} + \dot{Q}_{2e} = \dot{Q}_{aSECGN} + \dot{K}_{aSECGN} + \dot{Q}_{pSECGN}$$

W <sub>aSECGN</sub>	=	5.640	[kW]	Q <sub>aSECGN</sub>	=	209.481	[kW]
Q <sub>1e</sub>	=	97.468	[kW]	K <sub>aSECGN</sub>	=	1.764	[kW]
Q <sub>2e</sub>	=	140.788	[kW]	Q <sub>pSECGN</sub>	=	32.651	[kW]



## Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

### Compresor de Gas Natural - CGN

Cálculo de Energía							
<b>WaSECGN</b>	=	<b>5.640</b>	<b>[kW]</b>	<b>QaSECGN</b>	=	<b>209.481</b>	<b>[kW]</b>
VlíneaSECGN	=	220.000	[V]	MaSECGN	=	14.786	[kg/s]
IlíneaSECGN	=	20.000	[A]	Cpa	=	1.012	[kJ/kgK]
cos(Ø)	=	0.740	[]	TiaSECGN	=	298.000	[K]
1W	=	0.001	[kW]	TsaSECGN	=	312.000	[K]
<b>Q1e</b>	=	<b>97.468</b>	<b>[kW]</b>	<b>KaSECGN</b>	=	<b>1.764</b>	<b>[kW]</b>
				MaSECGN	=	14.786	[kg/s]
				VELaSECGN	=	15.446	[m/s]
<b>Q2e</b>	=	<b>140.788</b>	<b>[kW]</b>	VaSECGN	=	50,000.000	[Sm <sup>3</sup> /h]
				DdCGN	=	1.070	[m]
				1 h	=	3,600.000	[s]
				1W	=	0.001	[kW]
				<b>QpSECGN</b>	=	<b>32.651</b>	<b>[kW]</b>

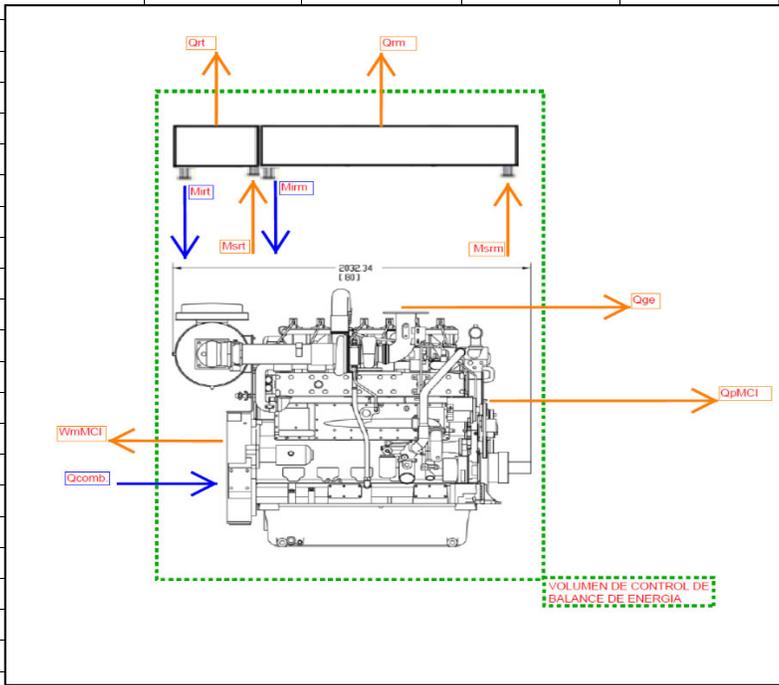


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Motor de Combustión Interna - CGN

Volumen de Control del CGN



Balace de Exergía

Haciendo un balance de Exergía para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\frac{d\dot{B}}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{VC} + \sum_i \dot{m}_i (h_i - T_o s_i) - \sum_s \dot{m}_s (h_s - T_o s_s) - T_o \dot{S}_{ger}$$

$$\bullet \dot{X}_{Q_{comb}} = \dot{X}_{W_{mMCI}} + \dot{X}_{Q_{ge}} + \dot{X}_{Q_{rt}} + \dot{X}_{Q_{rm}} + \dot{X}_{Q_{pMCI}} + \dot{X}_{dMCI}$$

XQncomb.	=	917.361	[kW]			XWmMCI	=	283.884	[kW]
						XQge	=	89.359	[kW]
						XQrt	=	1.222	[kW]
						XQrm	=	4.420	[kW]
						XQpMCI	=	9.104	[kW]
						XdMCI	=	529.371	[kW]



## Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

Motor de Combustión Interna - CGN							
Cálculo de Exergía							
<b>XQgncomb.</b>	=	<b>917.361</b>	<b>[kW]</b>	<b>XWmMCI</b>	=	<b>283.884</b>	<b>[kW]</b>
Mgncomb.	=	0.018	[kg/s]				
φgn	=	1.040	[]				
NHVng	=	48,365.000	[kJ/kg]				
<b>XQacomb.</b>	=	<b>-</b>	<b>[kW]</b>	<b>XQge</b>	=	<b>89.359</b>	<b>[kW]</b>
				Qge	=	222.286	[kW]
				Mge	=	0.740	[kg/s]
<b>Xqoil</b>	=		<b>[kW]</b>	To	=	298.000	[K]
				Cpge	=	0.632	[kJ/kgK]
				Tige	=	773.000	[K]
				R	=	0.287	[kJ/kgK]
				Po	=	1.000	[barg]
				Pge	=	1.000	[barg]
				<b>XQrt</b>	=	<b>1.222</b>	<b>[kW]</b>
				Qrt	=	46.813	[kW]
				Mirt	=	2.229	[kg/s]
				Cpr	=	3.500	[kJ/kg-K]
				To	=	298.000	[K]
				Tsrt	=	309.000	[K]
				Tirt	=	303.000	[K]
				<b>XQrm</b>	=	<b>4.420</b>	<b>[kW]</b>
				Qrm	=	169.274	[kW]
				Mirm	=	8.061	[kg/s]
				Cpr	=	3.500	[kJ/kg-K]
				To	=	298.000	[K]
				Tsrm	=	309.000	[K]
				Tirm	=	303.000	[K]
				<b>XQpMCI</b>	=	<b>9.104</b>	<b>[kW]</b>
				To	=	298.000	[K]
				TpMCI	=	316.000	[K]
				QpMCI	=	159.821	[kW]
				<b>XdMCI</b>	=	<b>529.371</b>	<b>[kW]</b>

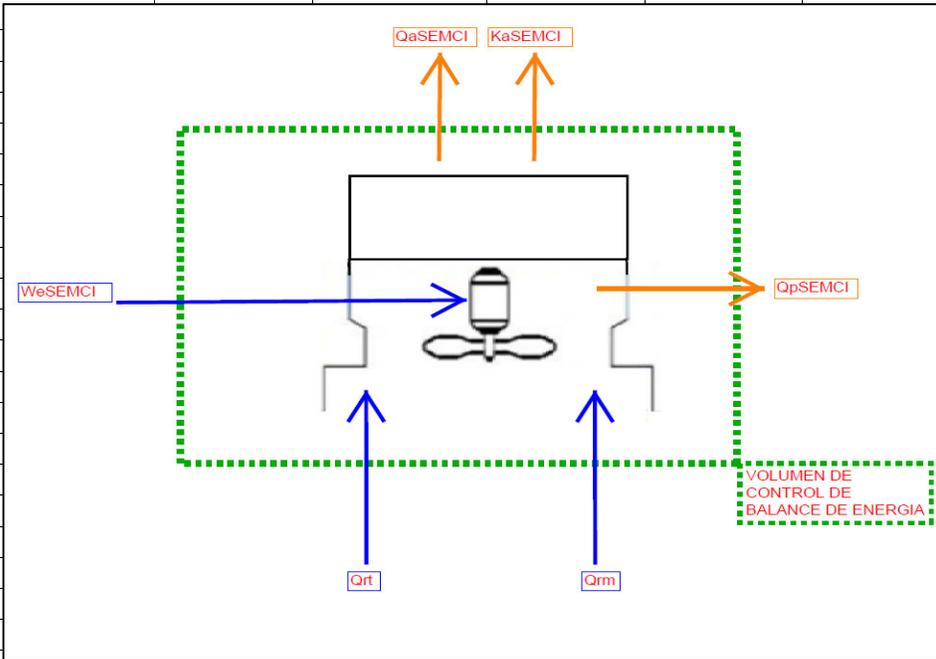


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Motor de Combustión Interna - CGN

Cálculo de Exergía



Balace de Exergía

Haciendo un balace de Exergía para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\dot{X}_{W_{aSEMCI}} + \dot{X}_{Q_{rt}} + \dot{X}_{Q_{rm}} = \dot{X}_{Q_{aSEMCI}} + \dot{X}_{K_{aSEMCI}} + \dot{X}_{Q_{pSEMCI}} + \dot{X}_{dSEMCI}$$

$X_{W_{aSEMCI}}$	=	5.640 [kW]		$X_{Q_{aSEMCI}}$	=	4.772 [kW]
$X_{Q_{rt}}$	=	1.222 [kW]		$X_{K_{aSEMCI}}$	=	1.764 [kW]
$X_{Q_{rm}}$	=	4.420 [kW]		$X_{Q_{pSEMCI}}$	=	0.659 [kW]
				$X_{dSEMCI}$	=	4.087 [kW]



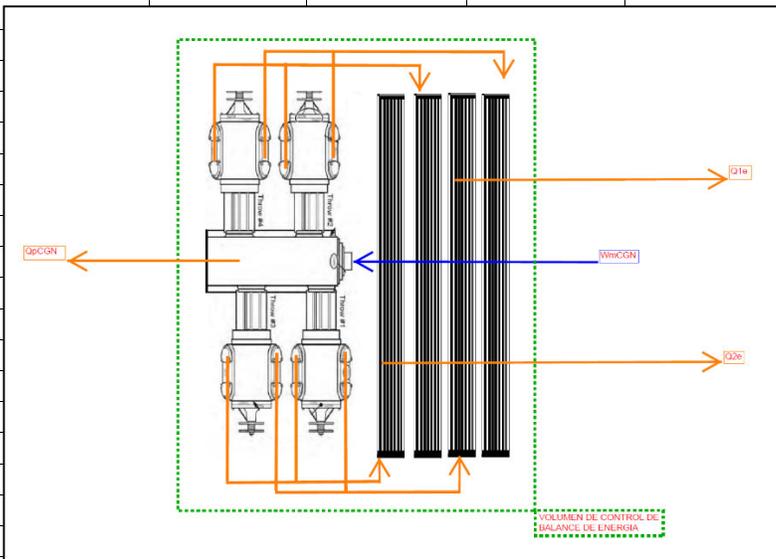


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Volumen de Control del CGN



Balance de Exergía

De la Ley de Conservación de la Energía para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\dot{X}_{W_{mCGN}} = \dot{X}_{Q_{1e}} + \dot{X}_{Q_{2e}} + \dot{X}_{Q_{pCGN}} + \dot{X}_{dCGN}$$

$X_{W_{mCGN}}$	=	269.690	[kW]	$X_{Q_{1e}}$	=	12.166	[kW]
				$X_{Q_{2e}}$	=	21.088	[kW]
				$X_{Q_{pCGN}}$	=	1.791	[kW]
				$X_{dCGN}$	=	234.646	[kW]



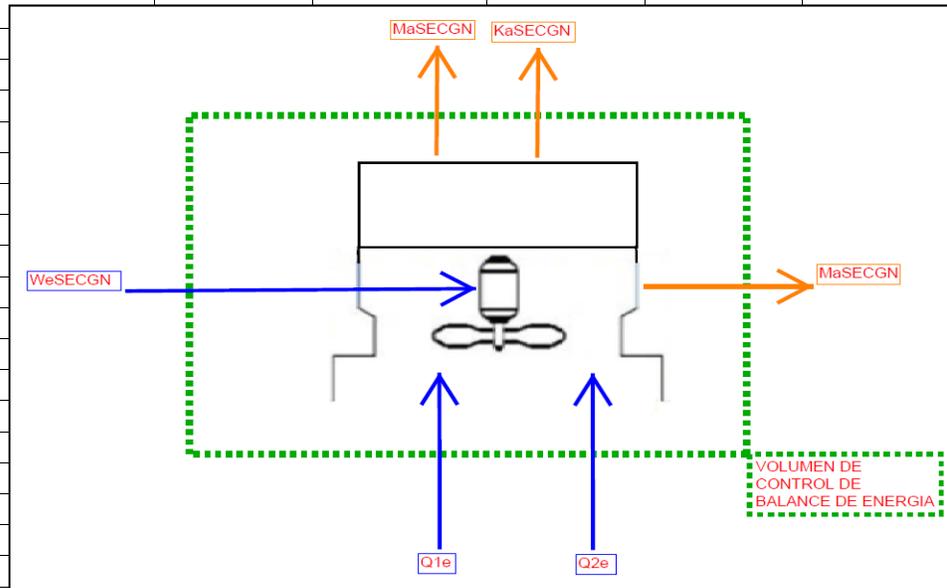


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
 Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
 Asesor: Mg. Fernando Jimenez

Compresor de Gas Natural - CGN

Cálculo de Exergía



$$\bullet \dot{X}_{W_{aSECGN}} + \dot{X}_{Q_{1e}} + \dot{X}_{Q_{2e}} = \dot{X}_{Q_{aSECGN}} + \dot{X}_{k_{aSECGN}} + \dot{X}_{Q_{pSECGN}} + \dot{X}_{dSECGN}$$

XW <sub>aSECGN</sub>	=	5.640 [kW]	XQ <sub>aSECGN</sub>	=	4.772 [kW]
XQ <sub>1e</sub>	=	12.166 [kW]	XK <sub>aSECGN</sub>	=	1.764 [kW]
XQ <sub>2e</sub>	=	21.088 [kW]	XQ <sub>pSECGN</sub>	=	2.054 [kW]
			Xd <sub>SEMCI</sub>	=	30.304 [kW]



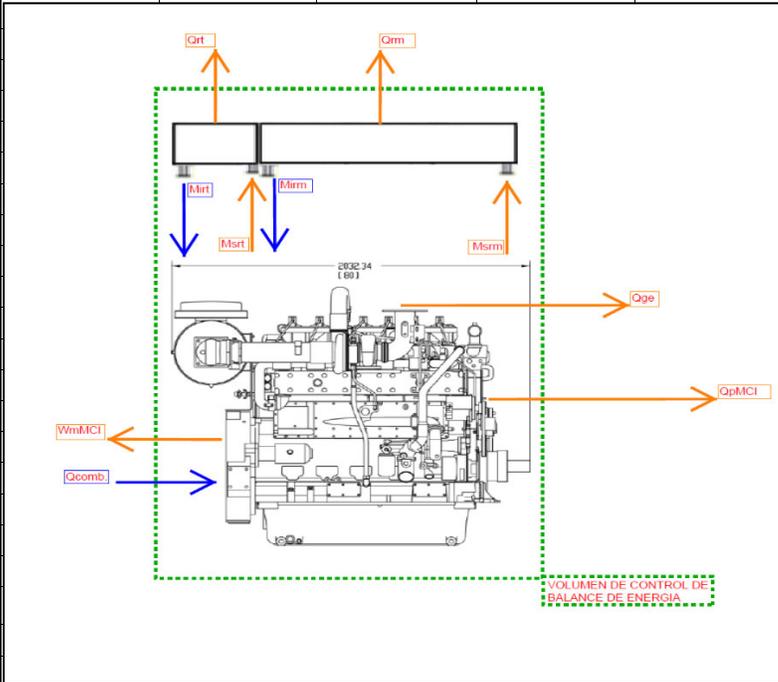


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Motor de Combustión Interna - CGN

Volumen de Control del CGN



Balance de Costos

Haciendo un balance de Costos para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\dot{C}_{\dot{Q}_{gncomb.}} + \dot{C}_{MCI} + \dot{C}_{o\&mMCI} = \dot{C}_{\dot{W}_{mMCI}} + \dot{C}_{\dot{Q}_{ge}} + \dot{C}_{\dot{Q}_{rt}} + \dot{C}_{\dot{Q}_{rm}} + \dot{C}_{\dot{Q}_{pMCI}} + \dot{C}_{\dot{W}_{dMCI}}$$

<b>CXQgncomb.</b>	=	<b>34.733</b>	<b>[\$/Ciclo]</b>	<b>CXWmMCI</b>	=	<b>10.748</b>	<b>[\$/ciclo]</b>
<b>CMCI</b>	=	<b>3.699</b>	<b>[\$/ciclo]</b>	<b>CXQge</b>	=	<b>3.383</b>	<b>[\$/ciclo]</b>
<b>Co&amp;mMCI</b>	=	<b>1.917</b>	<b>[\$/ciclo]</b>	<b>CXQrt</b>	=	<b>0.046</b>	<b>[\$/ciclo]</b>
				<b>CXQrm</b>	=	<b>0.167</b>	<b>[\$/ciclo]</b>
				<b>CXQpMCI</b>	=	<b>0.345</b>	<b>[\$/ciclo]</b>
				<b>CXdMCI</b>	=	<b>25.658</b>	<b>[\$/ciclo]</b>



## Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

Motor de Combustión Interna - CGN							
Cálculo de Costos							
<b>CXQgncomb.</b>	=	<b>34.733</b>	<b>[\$/Ciclo]</b>		<b>CXWmMCI</b>	=	<b>10.748</b> <b>[\$/ciclo]</b>
XQgncomb.	=	917.361	[kW]		Cgn(KJ)	=	0.000 <b>[\$/kJ]</b>
Tiempo llenado	=	6,162.876	[s/ciclo]		XWmMCI	=	283.884 <b>[kW]</b>
Cgn(KJ)	=	6.14E-06	[\$/kJ]		Tiempo llenado	=	6,162.876 <b>[s/ciclo]</b>
<b>CMCI</b>	=	<b>3.699</b>	<b>[\$/ciclo]</b>		<b>CXQge</b>	=	<b>3.383</b> <b>[\$/ciclo]</b>
CAPEX	=	135.000.000	[\$/unidad]		Cgn(KJ)	=	0.000 <b>[\$/kJ]</b>
TVU	=	10.000	[a]		XQge	=	89.359 <b>[kW]</b>
Ciclos anuales	=	3,650.000	[ciclo/a]		Tiempo llenado	=	6,162.876 <b>[s/ciclo]</b>
Ciclos dia	=	10.000	[ciclo/d]				
1 año	=	365.000	[d]				
					<b>CXQrt</b>	=	<b>0.046</b> <b>[\$/ciclo]</b>
					Cgn(KJ)	=	0.000 <b>[\$/kJ]</b>
<b>Co&amp;mMCI</b>	=	<b>1.917</b>	<b>[\$/ciclo]</b>		XQrt	=	1.222 <b>[kW]</b>
					Tiempo llenado	=	6,162.876 <b>[s/ciclo]</b>
					<b>CXQrm</b>	=	<b>0.167</b> <b>[\$/ciclo]</b>
					Cgn(KJ)	=	0.000 <b>[\$/kJ]</b>
					XQrm	=	4.420 <b>[kW]</b>
					Tiempo llenado	=	6,162.876 <b>[s/ciclo]</b>
					<b>CXQpMCI</b>	=	<b>0.345</b> <b>[\$/ciclo]</b>
					Cgn(KJ)	=	0.000 <b>[\$/kJ]</b>
					XQpMCI	=	9.104 <b>[kW]</b>
					Tiempo llenado	=	6,162.876 <b>[s/ciclo]</b>
					<b>CXdMCI</b>	=	<b>25.658</b> <b>[\$/ciclo]</b>
Cgn(KJ)	=	6.14E-06	[\$/kJ]				
Cgn(GJ)	=	6.144	[\$/GJ]				
Cgn(Sm3)	=	0.245	[\$/Sm3]				
PCSCalidda	=	0.040	[GJ/Sm3]				
CEE(kW-s)	=	1.98E-05	[\$/kW-s]				
CEE(kW-H)	=	0.071	[\$/kW-h]				
	Presión de Suministro	Rendimiento	Capacidad de Contenedor	Tiempo por Ciclo	Tiempo por Ciclo	Mantenimiento	
ITEM	[barg]	[Sm3/h]	[Sm3]	[h]	[s]	USD \$/ciclo	
1.000	45.000	4,740.000	7,000.000	1.477	5,316.456	1.667	
2.000	40.000	4,089.000	7,000.000	1.712	6,162.876	1.917	
3.000	35.000	3,455.000	7,000.000	2.026	7,293.777	2.204	
Mant.	USD\$/mes	500.000	575.000	661.250			
	USD\$/dia	16.667	19.167	22.042			
	USD\$/ciclo	1.667	1.917	2.204			

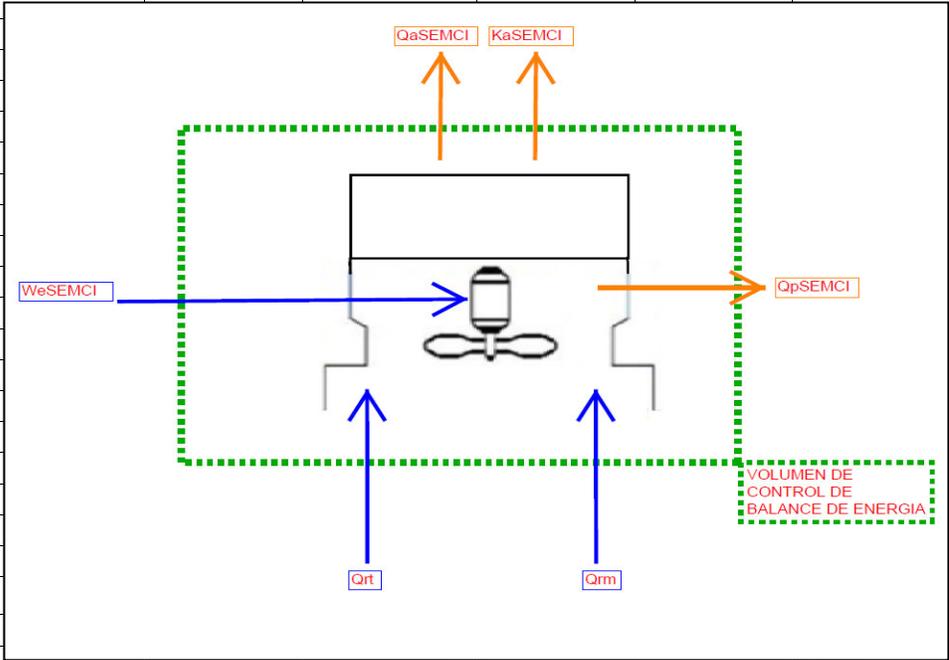


## Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

### Motor de Combustión Interna - CGN

Cálculo de Costos									
-------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--



Balance de Costos									
-------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Haciendo un balance de Costos para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\dot{C}_{W_{aSEMCI}} + \dot{C}_{SEMCI} + \dot{C}_{o\&mSEMCI} + \dot{C}_{Q_{rt}} + \dot{C}_{Q_{rm}} = \dot{C}_{Q_{aSEMCI}} + \dot{C}_{K_{aSEMCI}} + \dot{C}_{Q_{pSEMCI}} + \dot{C}_{dSEMCI}$$

<b>CW<sub>aSEMCI</sub></b>	=	<b>0.689</b>	[\$/ciclo]	<b>CXQ<sub>aSEMCI</sub></b>	=	<b>0.181</b>	[\$/ciclo]
----------------------------	---	--------------	------------	-----------------------------	---	--------------	------------

<b>CSEMCI</b>	=	<b>2.466</b>	[\$/ciclo]	<b>CXK<sub>aSEMCI</sub></b>	=	<b>0.216</b>	[\$/ciclo]
---------------	---	--------------	------------	-----------------------------	---	--------------	------------

<b>CXQ<sub>rt</sub></b>	=	<b>0.046</b>	[\$/ciclo]	<b>CXQ<sub>pSEMCI</sub></b>	=	<b>0.025</b>	[\$/ciclo]
-------------------------	---	--------------	------------	-----------------------------	---	--------------	------------

<b>CXQ<sub>rm</sub></b>	=	<b>0.167</b>	[\$/ciclo]	<b>CXdSEMCI</b>	=	<b>3.781</b>	[\$/ciclo]
-------------------------	---	--------------	------------	-----------------	---	--------------	------------

<b>Co&amp;mSEMCI</b>	=	<b>0.833</b>	[\$/ciclo]				
----------------------	---	--------------	------------	--	--	--	--



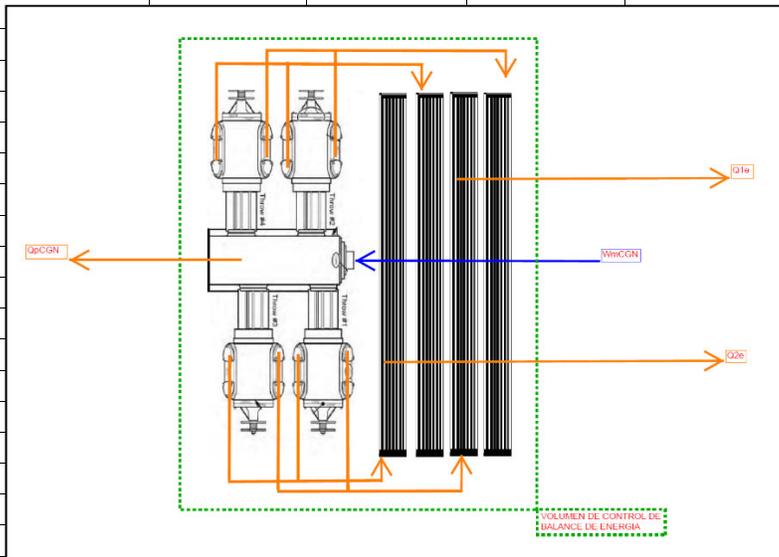


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Volumen de Control del CGN



Balance de Costos

De la Ley de Conservación de la Energía para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\dot{C}_{\dot{X}W_{mCGN}} + \dot{C}_{CGN} + \dot{C}_{O\&mCGN} = \dot{C}_{\dot{X}Q_{1e}} + \dot{C}_{\dot{X}Q_{2e}} + \dot{C}_{\dot{X}Q_{pCGN}} + \dot{C}_{\dot{X}dCGN}$$

$CXW_{mCGN}$	=	10.211	[\$/Ciclo]	$CXQ_{1e}$	=	0.461	[\$/Ciclo]
--------------	---	--------	------------	------------	---	-------	------------

$CCGN$	=	3.699	[\$/ciclo]	$CXQ_{2e}$	=	0.798	[\$/Ciclo]
--------	---	-------	------------	------------	---	-------	------------

$Co\&mCGN$	=	1.667	[\$/Ciclo]	$CXQ_{pCGN}$	=	0.068	[\$/Ciclo]
------------	---	-------	------------	--------------	---	-------	------------

				$CXdCGN$	=	14.249	[\$/Ciclo]
--	--	--	--	----------	---	--------	------------



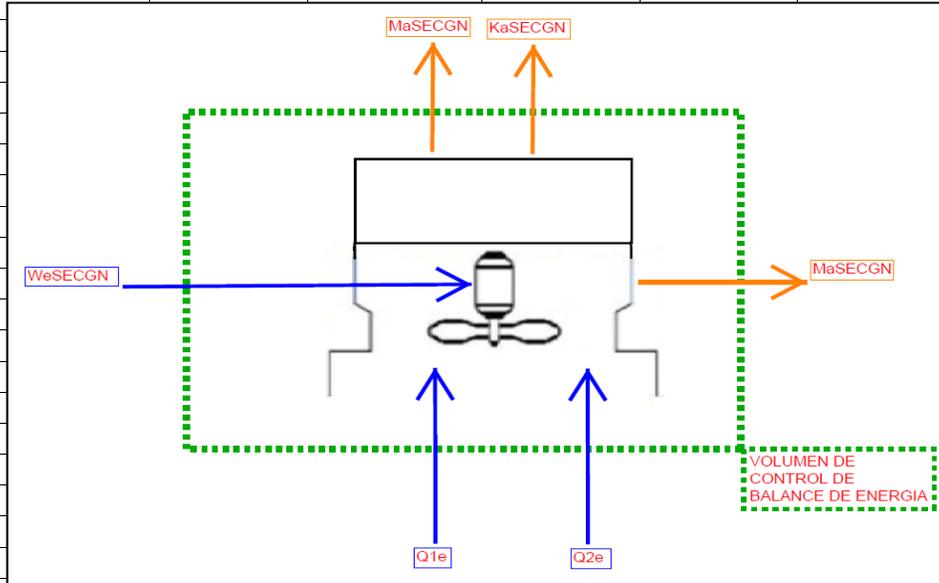


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Cálculo de Costos



$$\bullet \quad \dot{C}_{W_{mSECGN}} + \dot{C}_{SECGN} + \dot{C}_{o\&mSECGN} + \dot{C}_{Q_{1e}} + \dot{C}_{Q_{2e}} = \dot{C}_{Q_{aSECGN}} + \dot{C}_{K_{aSECGN}} + \dot{C}_{Q_{pSECGN}} + \dot{C}_{dSECGN}$$

<b>CW<sub>aSECGN</sub></b>	=	<b>0.689</b>	[\$/ciclo]		<b>CX<sub>Q<sub>aSECGN</sub></sub></b>	=	<b>0.181</b>	[\$/ciclo]
<b>CSECGN</b>	=	<b>2.466</b>	[\$/ciclo]		<b>CX<sub>K<sub>aSECGN</sub></sub></b>	=	<b>0.216</b>	[\$/ciclo]
<b>CX<sub>Q<sub>1e</sub></sub></b>	=	<b>0.461</b>	[\$/Ciclo]		<b>CX<sub>Q<sub>pSECGN</sub></sub></b>	=	<b>0.078</b>	[\$/ciclo]
<b>CX<sub>Q<sub>2e</sub></sub></b>	=	<b>0.798</b>	[\$/Ciclo]		<b>CX<sub>dSECGN</sub></b>	=	<b>4.773</b>	[\$/ciclo]
<b>Co&amp;mSECGN</b>	=	<b>0.833</b>	[\$/ciclo]					





**APENDICE 1.3**  
**CALCULOS A 35 BARG**



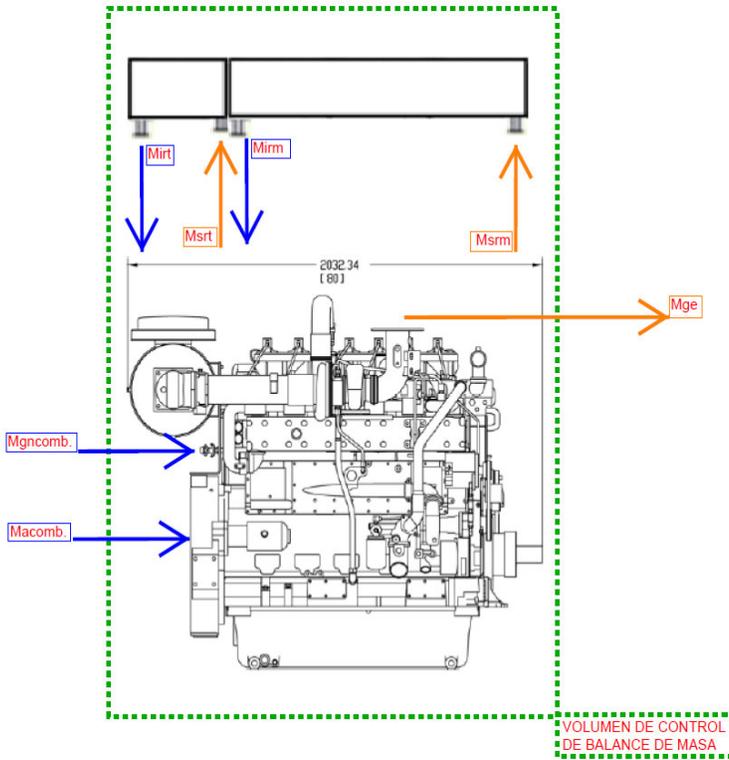


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Motor de Combustión Interna - MCI

Volumen de Control del MCI



<b>Mgncomb.</b>	Masa de Gas Natural Combustible
<b>Macomb.</b>	Masa de Aire Combustible
<b>Mge</b>	Masa de Salida de Gases de Escape
<b>Mirt</b>	Masa de Ingreso de Refrigerante del Turbo
<b>Msrt</b>	Masa de Salida del Refrigerante del Turbo
<b>Mirm</b>	Masa de Ingreso de Refrigerante del Motor
<b>Msrm</b>	Masa de Salida de Refrigerante del Motor



Balance de Masa

De la Ley de Conservación de la Masa para un Régimen Estacionario se tiene:

<b>Mgncomb.</b>	=	<b>0.017</b>	<b>[kg/s]</b>	<b>Mge</b>	=	<b>0.684</b>	<b>[kg/s]</b>
<b>Macomb.</b>	=	<b>0.667</b>	<b>[kg/s]</b>				
<b>Mirt</b>	=	<b>2.229</b>	<b>[kg/s]</b>	<b>Msrt</b>	=	<b>2.229</b>	<b>[kg/s]</b>
<b>Mirm</b>	=	<b>8.061</b>	<b>[kg/s]</b>	<b>Msrm</b>	=	<b>8.061</b>	<b>[kg/s]</b>



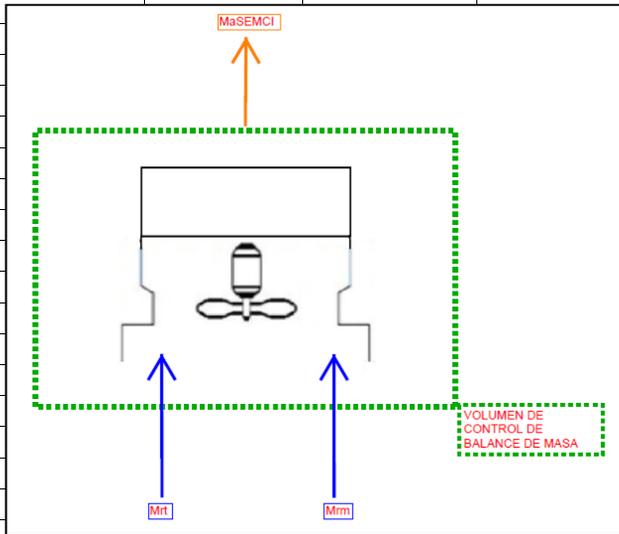


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Sistema de Enfriamiento del MCI

Volumen de Control del SEMCI



Balace de Masa

De la Ley de Conservación de la Masa para un Régimen Estacionario se tiene:

<b>Mart</b>	=	<b>3.696</b>	<b>[kg/s]</b>		<b>MaSEMCI</b>	=	<b>14.786</b>	<b>[kg/s]</b>
<b>Marm</b>	=	<b>11.089</b>	<b>[kg/s]</b>					



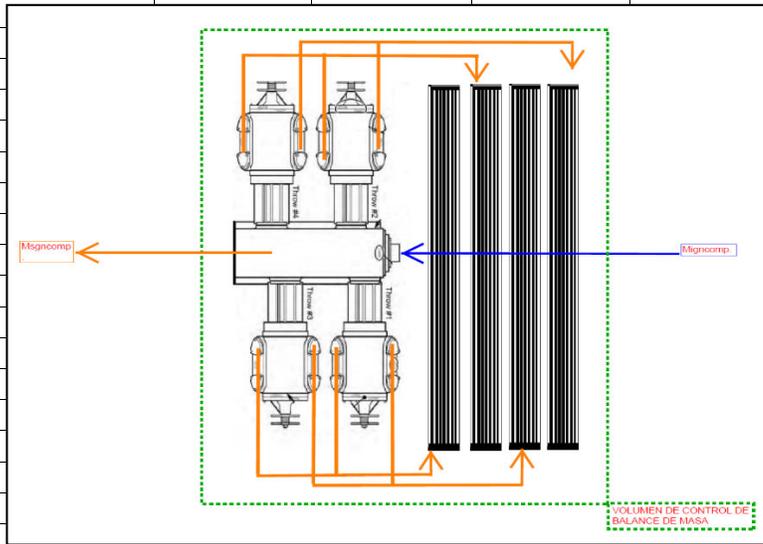


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Volumen de Control del CGN



**Mgncomp.** Masa de Ingreso de Gas Natural de Compresión.

**Mggncomp.** Masa de Salida de Gas Natural de Compresión.



Balance de Masa

De la Ley de Conservación de la Masa para un Régimen Estacionario se tiene:

<b>Mgncomp.</b>	=	<b>0.712</b>	<b>[kg/s]</b>	<b>Mggncomp.</b>	=	<b>0.712</b>	<b>[kg/s]</b>
-----------------	---	--------------	---------------	------------------	---	--------------	---------------



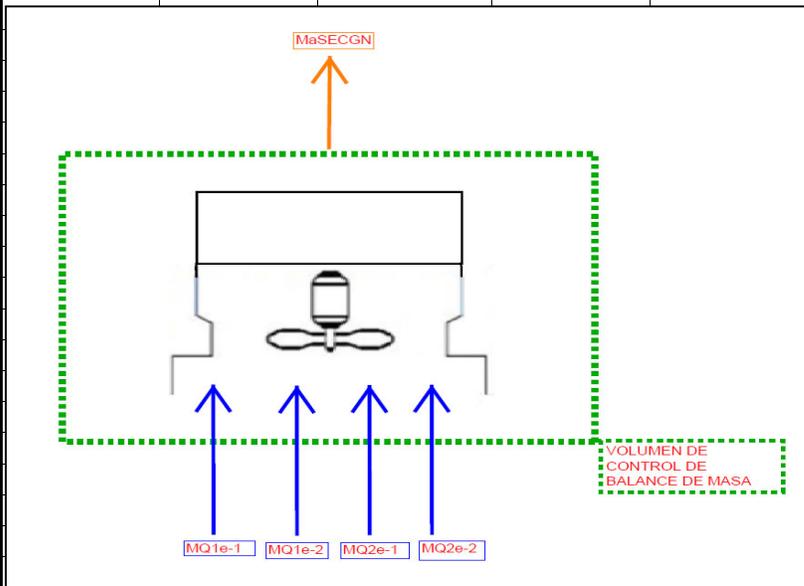


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Cálculo de Masas



Balace de Masa

De la Ley de Conservación de la Masa para un Régimen Estacionario se tiene:

Ma1e-1	=	3.696	[kg/s]		MaSECGN	=	14.786	[kg/s]
Ma1e-2	=	3.696	[kg/s]					
Ma2e-1	=	3.696	[kg/s]					
Ma2e-2	=	3.696	[kg/s]					



## Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

### Compresor de Gas Natural - CGN

Compresor de Gas Natural - CGN							
Cálculo de Masas							
VaSECGN	=	50,000.000	[Sm <sup>3</sup> /h]				
<b>Ma1e-1</b>	=	<b>3.696</b>	<b>[kg/s]</b>	<b>MaSECGN</b>	=	<b>14.786</b>	<b>[kg/s]</b>
Va1e	=	12,500.000	[m <sup>3</sup> /h]	Ma1e-1	=	3.696	[kg/s]
paire	=	0.066	[lb/ft <sup>3</sup> ]	Ma1e-2	=	3.696	[kg/s]
1lb/ft <sup>3</sup>	=	16.018	[kg/m <sup>3</sup> ]	Ma2e-1	=	3.696	[kg/s]
1 h	=	3,600.000	[s]	Ma2e-2	=	3.696	[kg/s]
<b>Ma1e-2</b>	=	<b>3.696</b>	<b>[kg/s]</b>				
Va1e	=	12,500.000	[m <sup>3</sup> /h]				
paire	=	0.066	[lb/ft <sup>3</sup> ]				
1lb/ft <sup>3</sup>	=	16.018	[kg/m <sup>3</sup> ]				
1 h	=	3,600.000	[s]				
<b>Ma2e-1</b>	=	<b>3.696</b>	<b>[kg/s]</b>				
Va2e	=	12,500.000	[m <sup>3</sup> /h]				
paire	=	0.066	[lb/ft <sup>3</sup> ]				
1lb/ft <sup>3</sup>	=	16.018	[kg/m <sup>3</sup> ]				
1 h	=	3,600.000	[s]				
<b>Ma2e-2</b>	=	<b>3.696</b>	<b>[kg/s]</b>				
Va2e	=	12,500.000	[m <sup>3</sup> /h]				
paire	=	0.066	[lb/ft <sup>3</sup> ]				
1lb/ft <sup>3</sup>	=	16.018	[kg/m <sup>3</sup> ]				
1 h	=	3,600.000	[s]				

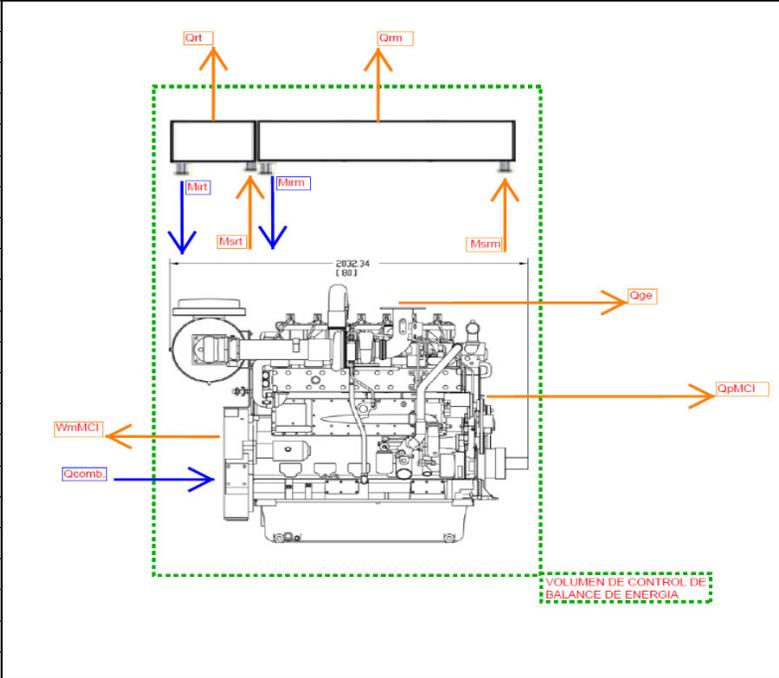


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Motor de Combustión Interna - MCI

Volumen de Control del MCI



<b>Qcomb.</b>	Calor de la Combustión
<b>WmMCI</b>	Potencia Mecánica del MCI
<b>Qge</b>	Calor de los Gases de Escape
<b>Qrt</b>	Calor de Refrigerante del Turbo
<b>Qrm</b>	Calor de Refrigerante del Motor
<b>QpMCI</b>	Calor de Perdidas del MCI

Balance de Energía

De la Ley de Conservación de la Energía para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \sum_{VC} \dot{Q}_{VC} - \sum_{VC} W_{VC} + \sum_{VC} \dot{m}_i \left[ h_i + \frac{1}{2} Vel_i^2 + gZ_i \right] - \sum_{VC} \dot{m}_s \left[ h_s + \frac{1}{2} Vel_s^2 + gZ_s \right]$$

$$\dot{Q}_{comb.} (\dot{Q}_{gncomb.} + \dot{Q}_{oil} + \dot{Q}_{acomb.}) = \dot{W}_{mMCI} + \dot{Q}_{ge} + \dot{Q}_{rt} + \dot{Q}_{rm} + \dot{Q}_{pMCI}$$

<b>Qcomb.</b>	=	814.599	[kW]	<b>WmMCI</b>	=	261.142	[kW]
				<b>Qge</b>	=	183.673	[kW]
				<b>Qrt</b>	=	46.813	[kW]
				<b>Qrm</b>	=	169.274	[kW]
				<b>QpMCI</b>	=	153.698	[kW]



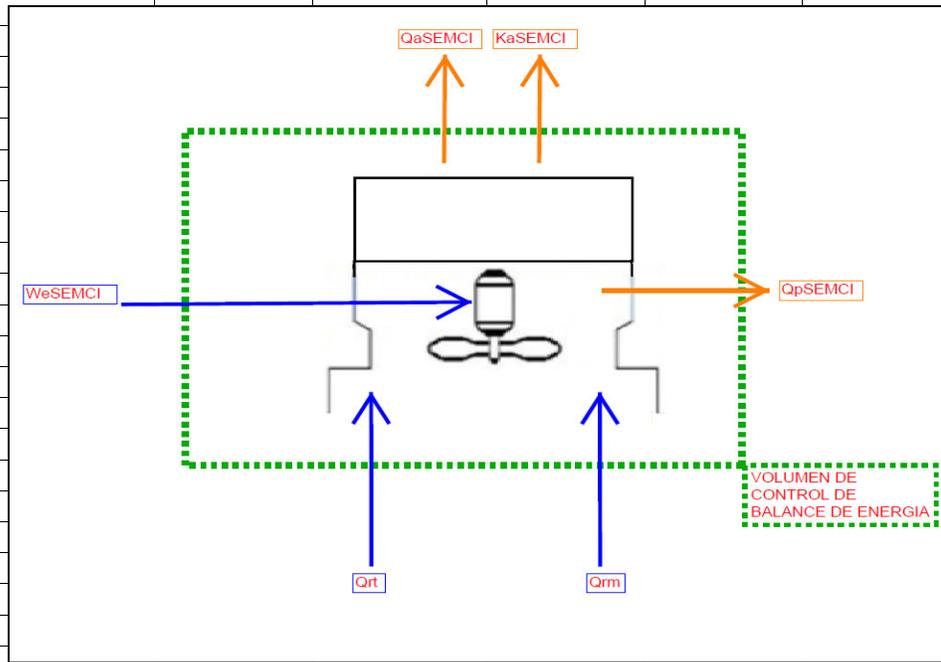


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

Sistema de Enfriamiento del MCI

Volumen de Control del SEMCI



Balance de Energía

De la Ley de Conservación de la Energía para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \sum_{VC} \dot{Q}_{VC} - \sum_{VC} W_{VC} + \sum_{VC} \dot{m}_i \left[ h_i + \frac{1}{2} vel_i^2 + gZ_i \right] - \sum_{VC} \dot{m}_s \left[ h_s + \frac{1}{2} vel_s^2 + gZ_s \right]$$

$$\dot{W}_{eSEMCI} + \dot{Q}_{rt} + \dot{Q}_{rm} = \dot{Q}_{aSEMCI} + \dot{K}_{aSEMCI} + \dot{Q}_{pSEMCI}$$

<b>WeSEMCI</b>	=	5.640	[kW]		<b>QaSEMCI</b>	=	179.555	[kW]
----------------	---	-------	------	--	----------------	---	---------	------

<b>Qrt</b>	=	46.813	[kW]		<b>KaSEMCI</b>	=	1.764	[kW]
------------	---	--------	------	--	----------------	---	-------	------

<b>Qrm</b>	=	169.274	[kW]		<b>QpSEMCI</b>	=	40.407	[kW]
------------	---	---------	------	--	----------------	---	--------	------



# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Sistema de Enfriamiento del MCI

Cálculo de Energía							
<b>WeSEMCI</b>	=	<b>5.640</b>	[kW]	<b>QaSEMCI</b>	=	<b>179.555</b>	[kW]
VlíneaSEMCI	=	220.000	[V]	MaSEMCI	=	14.786	[kg/s]
IlíneaSEMCI	=	20.000	[A]	Cpa	=	1.012	[kJ/kgK]
cos(Ø)	=	0.740	[]	TiSEMCI	=	298.000	[K]
1W	=	0.001	[kW]	TsSEMCI	=	310.000	[K]
<b>Qrt</b>	=	<b>46.813</b>	[kW]	<b>KaSEMCI</b>	=	<b>1.764</b>	[kW]
				MaSEMCI	=	14.786	[kg/s]
				VELaSEMCI	=	15.446	[m/s]
<b>Qrm</b>	=	<b>169.274</b>	[kW]	VaSEMCI	=	50,000.000	[m3/h]
				DdMCI	=	1.070	[m]
				1 h	=	3,600.000	[s]
				1W	=	0.001	[kW]
				<b>QpSEMCI</b>	=	<b>40.407</b>	[kW]

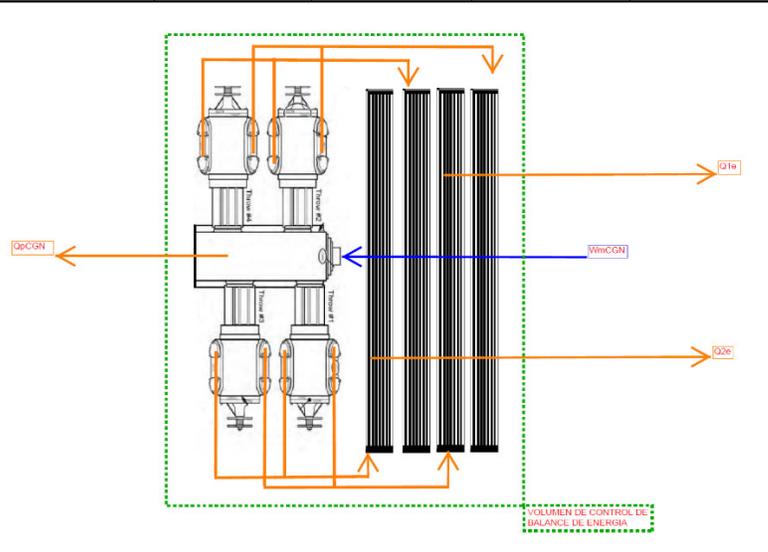


## Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

### Compresor de Gas Natural - CGN

Volumen de Control del CGN



<b>WmCGN</b>	Potencia Mecánica del CGN
<b>Q1e</b>	Calor de Primera Etapa
<b>Q2e</b>	Calor de Segunda Etapa
<b>QpCGN</b>	Calor de Pérdidas de CGN

Balance de Energía

De la Ley de Conservación de la Energía para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\dot{W}_{mCGN} = \dot{Q}_{1e} + \dot{Q}_{2e} + \dot{Q}_{pCGN}$$

<b>WmCGN</b>	=	<b>248.085</b>	[kW]	<b>Q1e</b>	=	<b>82.356</b>	[kW]
				<b>Q2e</b>	=	<b>118.959</b>	[kW]
				<b>QpCGN</b>	=	<b>46.770</b>	[kW]



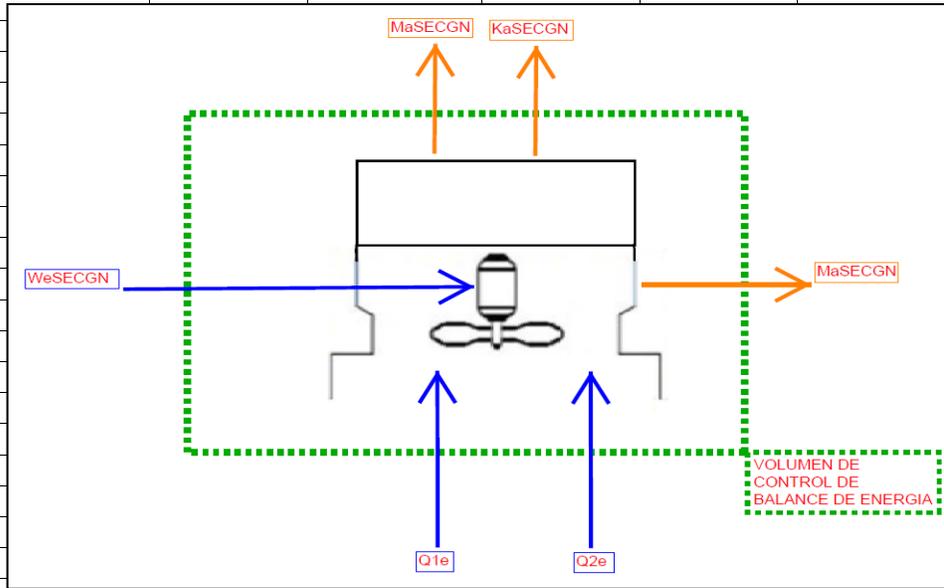


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Cálculo de Energía



$$\dot{W}_{aSECGN} + \dot{Q}_{1e} + \dot{Q}_{2e} = \dot{Q}_{aSECGN} + \dot{K}_{aSECGN} + \dot{Q}_{pSECGN}$$

W <sub>aSECGN</sub>	=	5.640	[kW]	Q <sub>aSECGN</sub>	=	179.555	[kW]
Q <sub>1e</sub>	=	82.356	[kW]	K <sub>aSECGN</sub>	=	1.764	[kW]
Q <sub>2e</sub>	=	118.959	[kW]	Q <sub>pSECGN</sub>	=	25.635	[kW]



# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Cálculo de Energía							
<b>WaSECGN</b>	=	<b>5.640</b>	<b>[kW]</b>	<b>QaSECGN</b>	=	<b>179.555</b>	<b>[kW]</b>
VlíneaSECGN	=	220.000	[V]	MaSECGN	=	14.786	[kg/s]
IlíneaSECGN	=	20.000	[A]	Cpa	=	1.012	[kJ/kgK]
cos(Ø)	=	0.740	[]	TiaSECGN	=	298.000	[K]
1W	=	0.001	[kW]	TsaSECGN	=	310.000	[K]
<b>Q1e</b>	=	<b>82.356</b>	<b>[kW]</b>	<b>KaSECGN</b>	=	<b>1.764</b>	<b>[kW]</b>
				MaSECGN	=	14.786	[kg/s]
				VELaSECGN	=	15.446	[m/s]
<b>Q2e</b>	=	<b>118.959</b>	<b>[kW]</b>	VaSECGN	=	50,000.000	[Sm <sup>3</sup> /h]
				DdCGN	=	1.070	[m]
				1 h	=	3,600.000	[s]
				1W	=	0.001	[kW]
				<b>QpSECGN</b>	=	<b>25.635</b>	<b>[kW]</b>

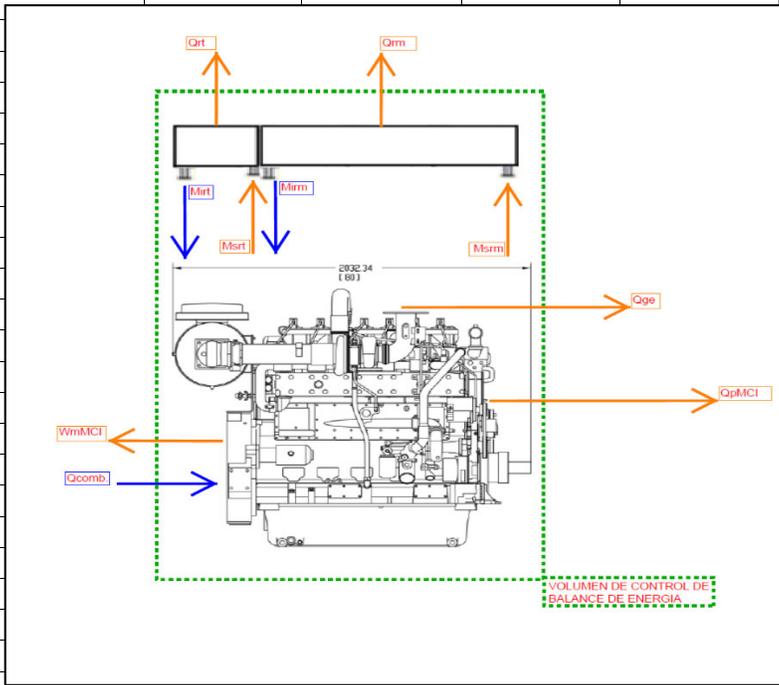


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Motor de Combustión Interna - CGN

Volumen de Control del CGN



Balance de Exergía

Haciendo un balance de Exergía para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\frac{d\dot{B}}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{VC} + \sum_i \dot{m}_i (h_i - T_o s_i) - \sum_s \dot{m}_s (h_s - T_o s_s) - T_o \dot{S}_{ger}$$

$$\bullet \dot{X}_{Q_{comb.}} = \dot{X}_{W_{mMCI}} + \dot{X}_{Q_{ge}} + \dot{X}_{Q_{rt}} + \dot{X}_{Q_{rm}} + \dot{X}_{Q_{pMCI}} + \dot{X}_{dMCI}$$

XQncomb.	=	847.183	[kW]			XWmMCI	=	261.142	[kW]
						XQge	=	69.527	[kW]
						XQrt	=	1.222	[kW]
						XQrm	=	4.420	[kW]
						XQpMCI	=	7.366	[kW]
						XdMCI	=	503.506	[kW]



## Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

### Motor de Combustión Interna - CGN

Motor de Combustión Interna - CGN							
Cálculo de Exergía							
<b>XQgncomb.</b>	=	<b>847.183</b>	[kW]		<b>XWmMCI</b>	=	<b>261.142</b> [kW]
Mgncomb.	=	0.017	[kg/s]				
φgn	=	1.040	[]				
NHVng	=	48,365.000	[kJ/kg]				
<b>XQacomb.</b>	=	-	[kW]		<b>XQge</b>	=	<b>69.527</b> [kW]
					Qge	=	183.673 [kW]
					Mge	=	0.684 [kg/s]
<b>Xqoil</b>	=		[kW]		To	=	298.000 [K]
					Cpge	=	0.632 [kJ/kgK]
					Tige	=	723.000 [K]
					R	=	0.287 [kJ/kgK]
					Po	=	1.000 [barg]
					Pge	=	1.000 [barg]
					<b>XQrt</b>	=	<b>1.222</b> [kW]
					Qrt	=	46.813 [kW]
					Mirt	=	2.229 [kg/s]
					Cpr	=	3.500 [kJ/kg-K]
					To	=	298.000 [K]
					Tsrt	=	309.000 [K]
					Tirt	=	303.000 [K]
					<b>XQrm</b>	=	<b>4.420</b> [kW]
					Qrm	=	169.274 [kW]
					Mirm	=	8.061 [kg/s]
					Cpr	=	3.500 [kJ/kg-K]
					To	=	298.000 [K]
					Tsrm	=	309.000 [K]
					Tirm	=	303.000 [K]
					<b>XQpMCI</b>	=	<b>7.366</b> [kW]
					To	=	298.000 [K]
					TpMCI	=	313.000 [K]
					QpMCI	=	153.698 [kW]
					<b>XdMCI</b>	=	<b>503.506</b> [kW]

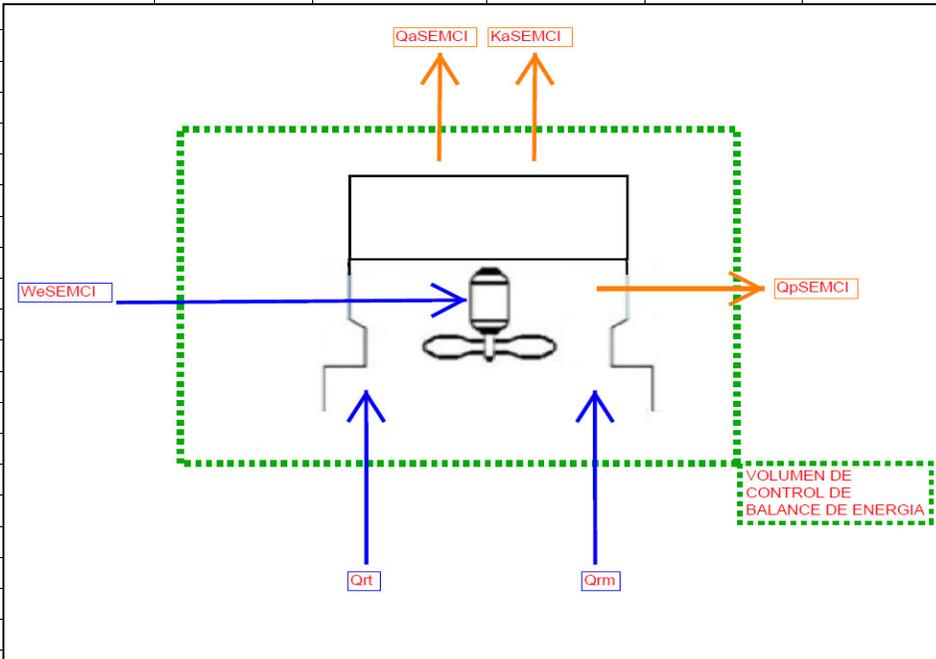


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Motor de Combustión Interna - CGN

Cálculo de Exergía



Balace de Exergía

Haciendo un balance de Exergía para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\bullet \dot{X}_{W_{aSEMCI}} + \dot{X}_{Q_{rt}} + \dot{X}_{Q_{rm}} = \dot{X}_{Q_{aSEMCI}} + \dot{X}_{K_{aSEMCI}} + \dot{X}_{Q_{pSEMCI}} + \dot{X}_{dSEMCI}$$

$X_{W_{aSEMCI}}$	=	5.640 [kW]		$X_{Q_{aSEMCI}}$	=	3.521 [kW]
------------------	---	------------	--	------------------	---	------------

$X_{Q_{rt}}$	=	1.222 [kW]		$X_{K_{aSEMCI}}$	=	1.764 [kW]
--------------	---	------------	--	------------------	---	------------

$X_{Q_{rm}}$	=	4.420 [kW]		$X_{Q_{pSEMCI}}$	=	2.541 [kW]
--------------	---	------------	--	------------------	---	------------

				$X_{dSEMCI}$	=	3.456 [kW]
--	--	--	--	--------------	---	------------



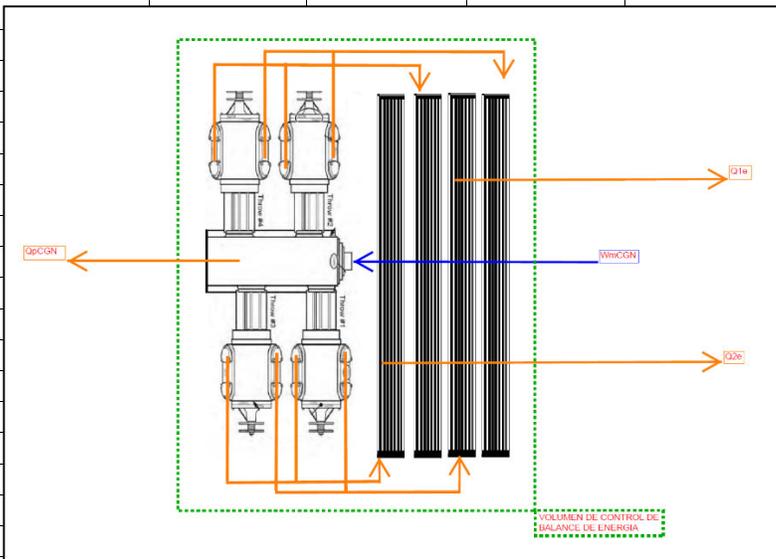


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Volumen de Control del CGN



Balance de Exergía

De la Ley de Conservación de la Energía para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\bullet \dot{X}_{W_{mCGN}} = \dot{X}_{Q_{1e}} + \dot{X}_{Q_{2e}} + \dot{X}_{Q_{pCGN}} + \dot{X}_{dCGN}$$

XWmCGN	=	248.085	[kW]	XQ1e	=	10.279	[kW]
				XQ2e	=	17.818	[kW]
				XQpGN	=	2.241	[kW]
				XdCGN	=	217.746	[kW]



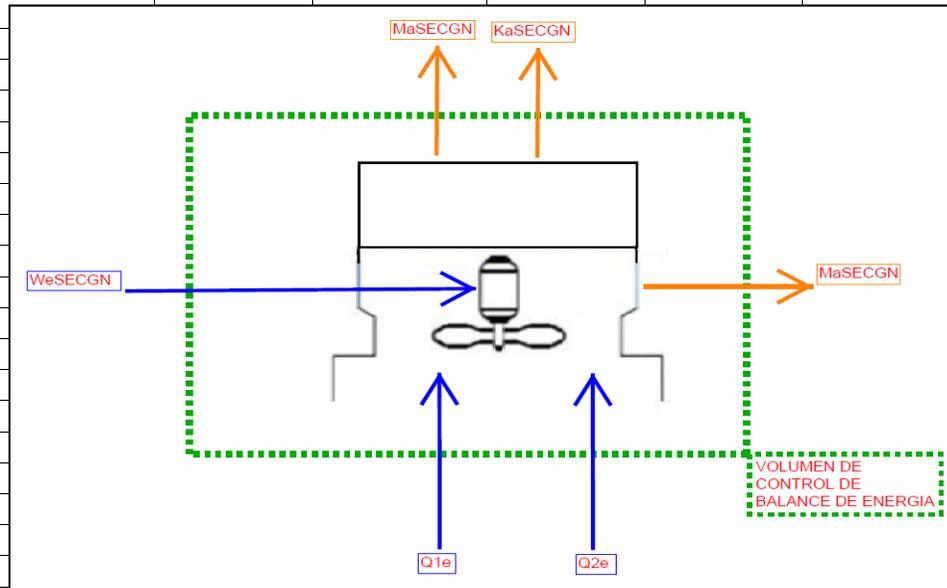


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

Compresor de Gas Natural - CGN

Cálculo de Exergía



$$\bullet \dot{X}_{W_{aSECGN}} + \dot{X}_{Q_{1e}} + \dot{X}_{Q_{2e}} = \dot{X}_{Q_{aSECGN}} + \dot{X}_{k_{aSECGN}} + \dot{X}_{Q_{pSECGN}} + \dot{X}_{dSECGN}$$

XW <sub>aSECGN</sub>	=	5.640 [kW]		XQ <sub>aSECGN</sub>	=	3.521 [kW]
XQ <sub>1e</sub>	=	10.279 [kW]		XK <sub>aSECGN</sub>	=	1.764 [kW]
XQ <sub>2e</sub>	=	17.818 [kW]		XQ <sub>pSECGN</sub>	=	1.612 [kW]
				Xd <sub>SEMCI</sub>	=	26.840 [kW]



# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Cálculo de Exergía							
<b>XWaSECGN</b>	=	<b>5.640</b>	[kW]	<b>XQaSECGN</b>	=	<b>3.521</b>	[kW]
				QaSECGN	=	179.555	[kW]
				MaSECGN	=	14.786	[kg/s]
<b>XQ1e</b>	=	<b>10.279</b>	[kW]	To	=	298.000	[K]
				Cpa	=	1.012	[kJ/kgK]
				TsaSECGN	=	310.000	[K]
<b>XQ2e</b>	=	<b>17.818</b>	[kW]	R	=	0.287	[kJ/kgK]
				Po	=	1.000	[barg]
				PaSECGN	=	1.000	[barg]
				<b>XKaSECGN</b>	=	<b>1.764</b>	[kW]
				<b>XQpSECGN</b>	=	<b>1.612</b>	[kW]
				To	=	298.000	[K]
				TQpSECGN	=	318.000	[K]
				QpSECGN	=	25.635	[kW]
				<b>XdSEMCI</b>	=	<b>26.840</b>	[kW]

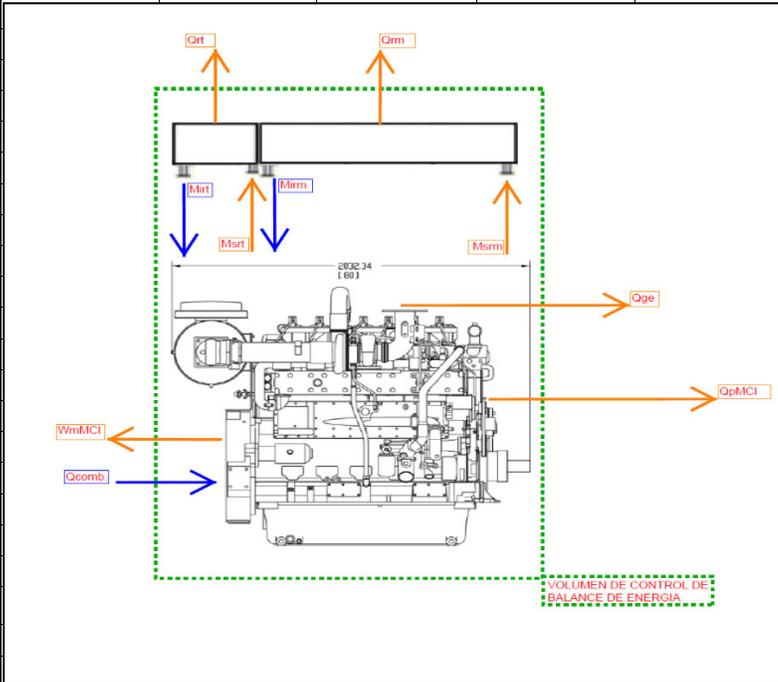


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Motor de Combustión Interna - CGN

### Volumen de Control del CGN



### Balance de Costos

Haciendo un balance de Costos para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\dot{C}_{Q_{gncomb.}} + \dot{C}_{MCI} + \dot{C}_{o\&mMCI} = \dot{C}_{W_{mMCI}} + \dot{C}_{Q_{ge}} + \dot{C}_{Q_{rt}} + \dot{C}_{Q_{rm}} + \dot{C}_{Q_{pMCI}} + \dot{C}_{dMCI}$$

<b>CXQgncomb.</b>	=	<b>37.962</b>	<b>[\$/Ciclo]</b>	<b>CXWmMCI</b>	=	<b>11.702</b>	<b>[\$/ciclo]</b>
<b>CMCI</b>	=	<b>3.699</b>	<b>[\$/ciclo]</b>	<b>CXQge</b>	=	<b>3.115</b>	<b>[\$/ciclo]</b>
<b>Co&amp;mMCI</b>	=	<b>2.204</b>	<b>[\$/ciclo]</b>	<b>CXQrt</b>	=	<b>0.055</b>	<b>[\$/ciclo]</b>
				<b>CXQrm</b>	=	<b>0.198</b>	<b>[\$/ciclo]</b>
				<b>CXQpMCI</b>	=	<b>0.330</b>	<b>[\$/ciclo]</b>
				<b>CXdMCI</b>	=	<b>28.465</b>	<b>[\$/ciclo]</b>



## Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

Motor de Combustión Interna - CGN							
Cálculo de Costos							
<b>CXQgncomb.</b>	=	<b>37.962</b>	<b>[\$/Ciclo]</b>		<b>CXWmMCI</b>	=	<b>11.702</b> <b>[\$/ciclo]</b>
XQgncomb.	=	847.183	[kW]		Cgn(KJ)	=	0.000 <b>[\$/kJ]</b>
Tiempo llenado	=	7,293.777	[s/ciclo]		XWmMCI	=	261.142 <b>[kW]</b>
Cgn(KJ)	=	6.14E-06	[\$/kJ]		Tiempo llenado	=	7,293.777 <b>[s/ciclo]</b>
<b>CMCI</b>	=	<b>3.699</b>	<b>[\$/ciclo]</b>		<b>CXQge</b>	=	<b>3.115</b> <b>[\$/ciclo]</b>
CAPEX	=	135.000.000	[\$/unidad]		Cgn(KJ)	=	0.000 <b>[\$/kJ]</b>
TVU	=	10.000	[a]		XQge	=	69.527 <b>[kW]</b>
Ciclos anuales	=	3,650.000	[ciclo/a]		Tiempo llenado	=	7,293.777 <b>[s/ciclo]</b>
Ciclos dia	=	10.000	[ciclo/d]				
1 año	=	365.000	[d]				
					<b>CXQrt</b>	=	<b>0.055</b> <b>[\$/ciclo]</b>
					Cgn(KJ)	=	0.000 <b>[\$/kJ]</b>
<b>Co&amp;mMCI</b>	=	<b>2.204</b>	<b>[\$/ciclo]</b>		XQrt	=	1.222 <b>[kW]</b>
					Tiempo llenado	=	7,293.777 <b>[s/ciclo]</b>
					<b>CXQrm</b>	=	<b>0.198</b> <b>[\$/ciclo]</b>
					Cgn(KJ)	=	0.000 <b>[\$/kJ]</b>
					XQrm	=	4.420 <b>[kW]</b>
					Tiempo llenado	=	7,293.777 <b>[s/ciclo]</b>
					<b>CXQpMCI</b>	=	<b>0.330</b> <b>[\$/ciclo]</b>
					Cgn(KJ)	=	0.000 <b>[\$/kJ]</b>
					XQpMCI	=	7.366 <b>[kW]</b>
					Tiempo llenado	=	7,293.777 <b>[s/ciclo]</b>
					<b>CXdMCI</b>	=	<b>28.465</b> <b>[\$/ciclo]</b>
Cgn(KJ)	=	6.14E-06	[\$/kJ]				
Cgn(GJ)	=	6.144	[\$/GJ]				
Cgn(Sm3)	=	0.245	[\$/Sm3]				
PCSCalidda	=	0.040	[GJ/Sm3]				
CEE(kW-s)	=	1.98E-05	[\$./kW-s]				
CEE(kW-H)	=	0.071	[\$./kW-h]				
	Presión de Suministro	Rendimiento	Capacidad de Contenedor	Tiempo por Ciclo	Tiempo por Ciclo	Mantenimiento	
ITEM	[barg]	[Sm3/h]	[Sm3]	[h]	[s]	USD \$/ciclo	
1.000	45.000	4,740.000	7,000.000	1.477	5,316.456	1.667	
2.000	40.000	4,089.000	7,000.000	1.712	6,162.876	1.917	
3.000	35.000	3,455.000	7,000.000	2.026	7,293.777	2.204	
Mant.	USD\$/mes	500.000	575.000	661.250			
	USD\$/dia	16.667	19.167	22.042			
	USD\$/ciclo	1.667	1.917	2.204			

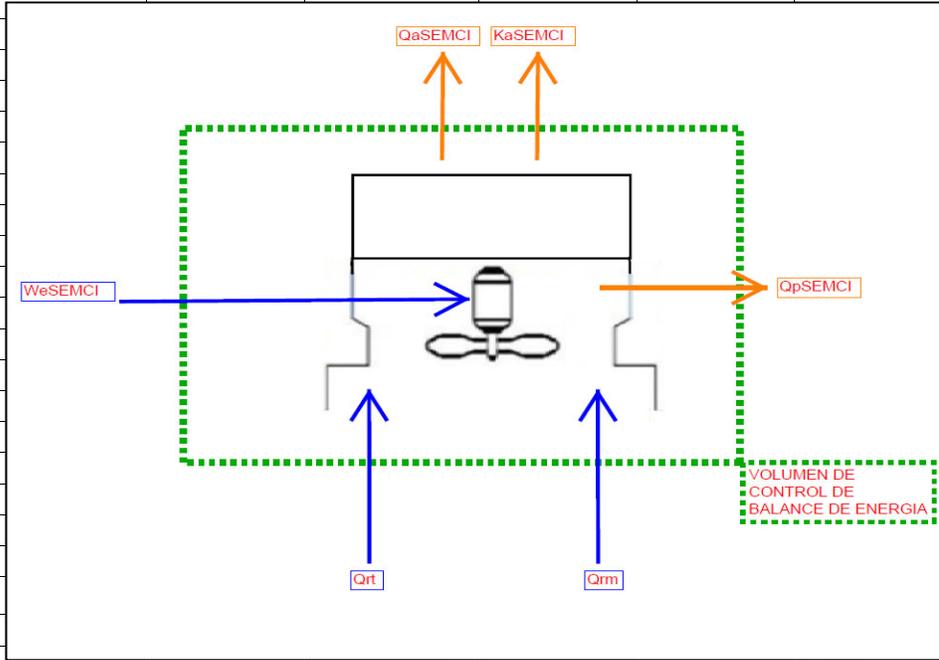


## Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

### Motor de Combustión Interna - CGN

Cálculo de Costos



Balance de Costos

Haciendo un balance de Costos para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\dot{C}_{X_{W_{aSEMCI}}} + \dot{C}_{SEMCI} + \dot{C}_{O\&mSEMCI} + \dot{C}_{X_{Q_{rt}}} + \dot{C}_{X_{Q_{rm}}} = \dot{C}_{X_{Q_{aSEMCI}}} + \dot{C}_{X_{K_{aSEMCI}}} + \dot{C}_{X_{Q_{pSEMCI}}} + \dot{C}_{X_{dSEMCI}}$$

$C_{W_{aSEMCI}}$	=	0.816	[\$/ciclo]	$C_{X_{Q_{aSEMCI}}}$	=	0.158	[\$/ciclo]
$C_{SEMCI}$	=	2.466	[\$/ciclo]	$C_{X_{K_{aSEMCI}}}$	=	0.255	[\$/ciclo]
$C_{X_{Q_{rt}}}$	=	0.055	[\$/ciclo]	$C_{X_{Q_{pSEMCI}}}$	=	0.114	[\$/ciclo]
$C_{X_{Q_{rm}}}$	=	0.198	[\$/ciclo]	$C_{X_{dSEMCI}}$	=	3.841	[\$/ciclo]
$C_{O\&mSEMCI}$	=	0.833	[\$/ciclo]				



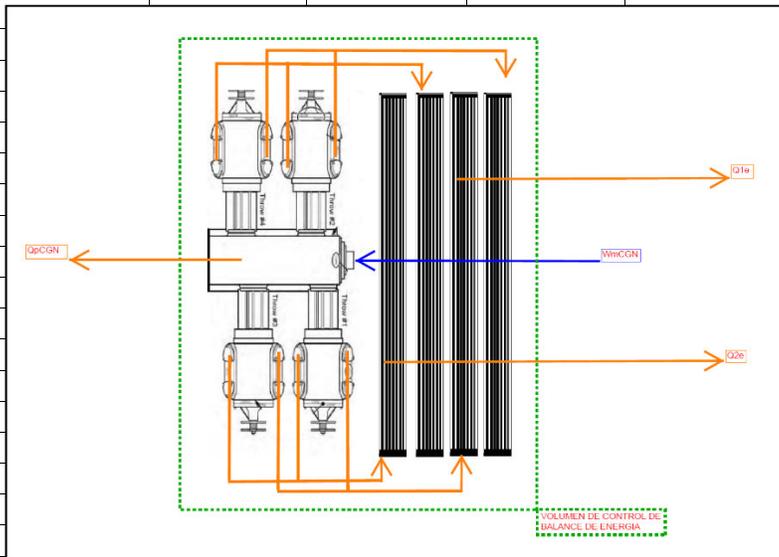


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Volumen de Control del CGN



Balance de Costos

De la Ley de Conservación de la Energía para un Régimen Estacionario se tiene:

$$\dot{C}_{\dot{X}_{W_{mCGN}}} + \dot{C}_{CGN} + \dot{C}_{o\&m_{CGN}} = \dot{C}_{\dot{X}_{Q_{1e}}} + \dot{C}_{\dot{X}_{Q_{2e}}} + \dot{C}_{\dot{X}_{Q_{pCGN}}} + \dot{C}_{\dot{X}_{dCGN}}$$

$CX_{W_{mCGN}}$	=	11.117	[\$/Ciclo]	$CX_{Q_{1e}}$	=	0.461	[\$/Ciclo]
-----------------	---	--------	------------	---------------	---	-------	------------

$CC_{GN}$	=	3.699	[\$/ciclo]	$CX_{Q_{2e}}$	=	0.798	[\$/Ciclo]
-----------	---	-------	------------	---------------	---	-------	------------

$Co\&m_{CGN}$	=	1.667	[\$/Ciclo]	$CX_{Q_{pCGN}}$	=	0.100	[\$/Ciclo]
---------------	---	-------	------------	-----------------	---	-------	------------

				$CX_{dCGN}$	=	15.122	[\$/Ciclo]
--	--	--	--	-------------	---	--------	------------



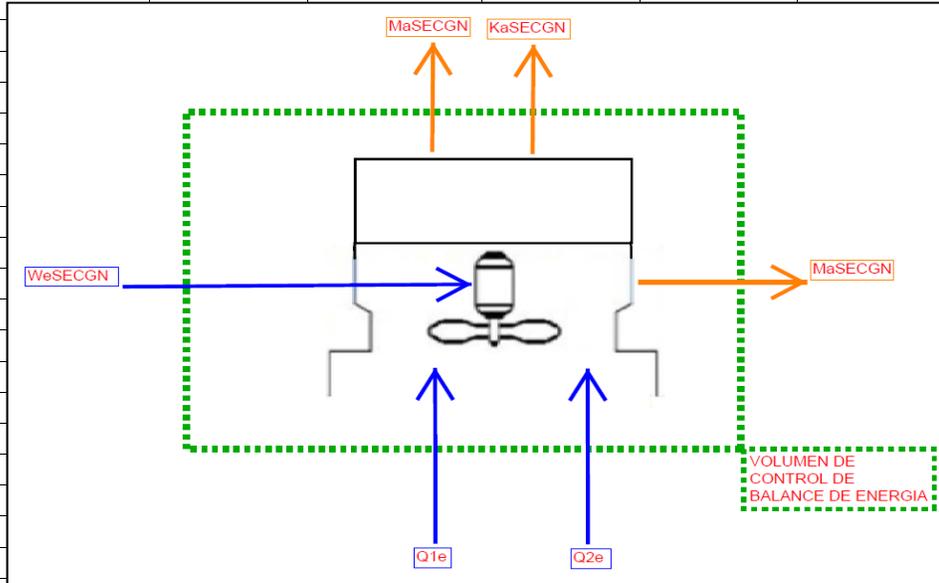


# Análisis EXCEM de la UCGN de una Estación de Carga de GNC

Tesis de Maestría en Energía  
Aplicante: Ing. Jesus Maravi  
Asesor: Mg. Fernando Jimenez

## Compresor de Gas Natural - CGN

Cálculo de Costos



$$\bullet \quad \dot{C}_{\dot{W}_{mSECGN}} + \dot{C}_{SECGN} + \dot{C}_{o\&mSECGN} + \dot{C}_{\dot{Q}_{1e}} + \dot{C}_{\dot{Q}_{2e}} = \dot{C}_{\dot{Q}_{aSECGN}} + \dot{C}_{\dot{K}_{aSECGN}} + \dot{C}_{\dot{Q}_{pSECGN}} + \dot{C}_{\dot{dSECGN}}$$

CWaSECGN	=	0.816	[\$/ciclo]		CXQaSECGN	=	0.158	[\$/ciclo]
CSECGN	=	2.466	[\$/ciclo]		CXKaSECGN	=	0.255	[\$/ciclo]
CXQ1e	=	0.461	[\$/Ciclo]		CXQpSECGN	=	0.072	[\$/ciclo]
CXQ2e	=	0.798	[\$/Ciclo]		CXdSEMCI	=	4.889	[\$/ciclo]
Co&mSECGN	=	0.833	[\$/ciclo]					



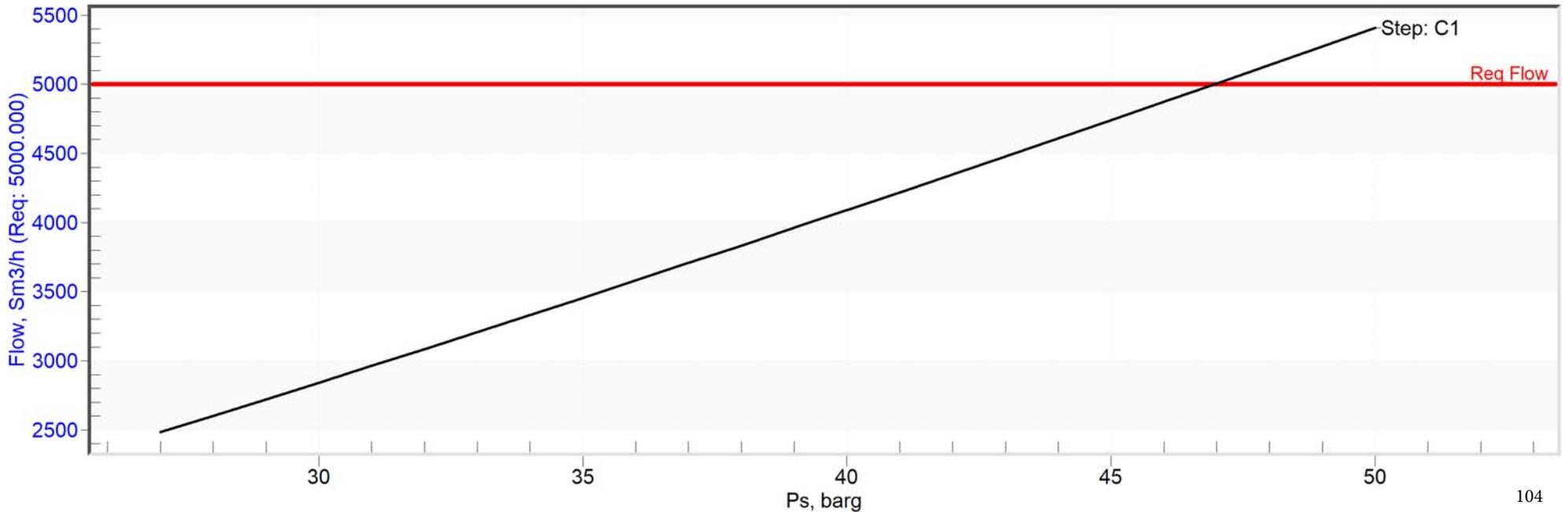
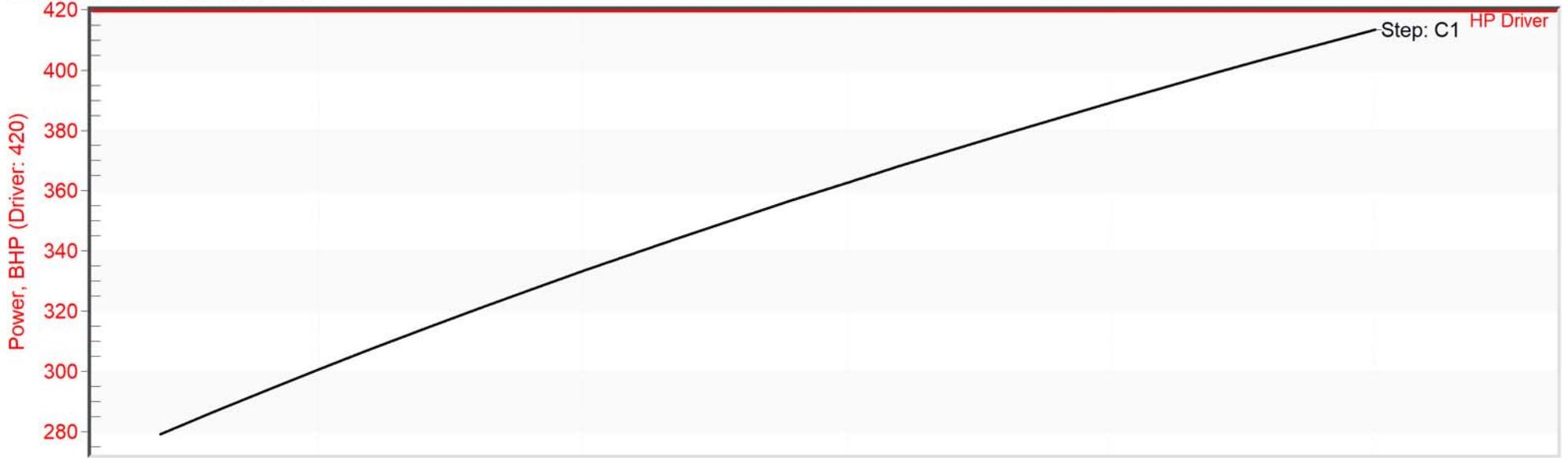


# PERU

RPM: 1800.0, Pd, barg: 250.00

Driver: Cummins Model: KTA19GC420  
Frame: JGA/4, Sm<sup>3</sup>/h at 1.01 bara, 15.0 C  
Thw1CE: 3-5/8SG-CE (85.725) Stage: 1, Service: Service 1, SG: 0.6058, Suct Temp (C): 25.00  
Thw2CE: 3-5/8SG-CE (85.725) Stage: 1  
Thw3CE: 3-5/8SG-CE (85.725) Stage: 1  
Thw4CE: 3-5/8SG-CE (85.725) Stage: 1  
Thw1HE: 1-3/4SG-FS-HE (41.275) Stage: 2  
Thw2HE: 1-3/4SG-FS-HE (41.275) Stage: 2  
Thw3HE: 1-3/4SG-FS-HE (41.275) Stage: 2  
Thw4HE: 1-3/4SG-FS-HE (41.275) Stage: 2

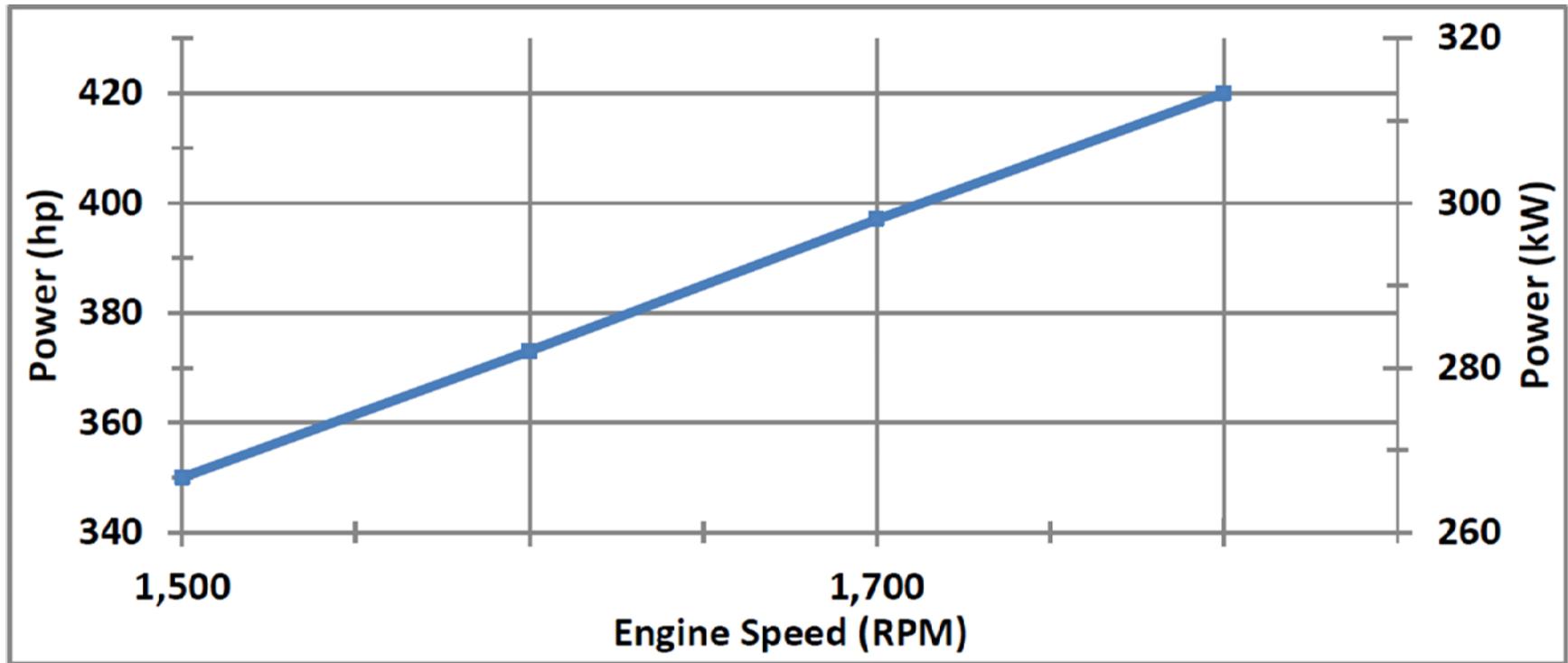
Ariel 7.7.6.0 MRV 1.28  
Frame F44553 Thesis - copia  
TECNIGAS INGENIEROS 48 BAR 5200 NM3 - CUMMINS KTA19 - 1800 RPM\_MR.csv



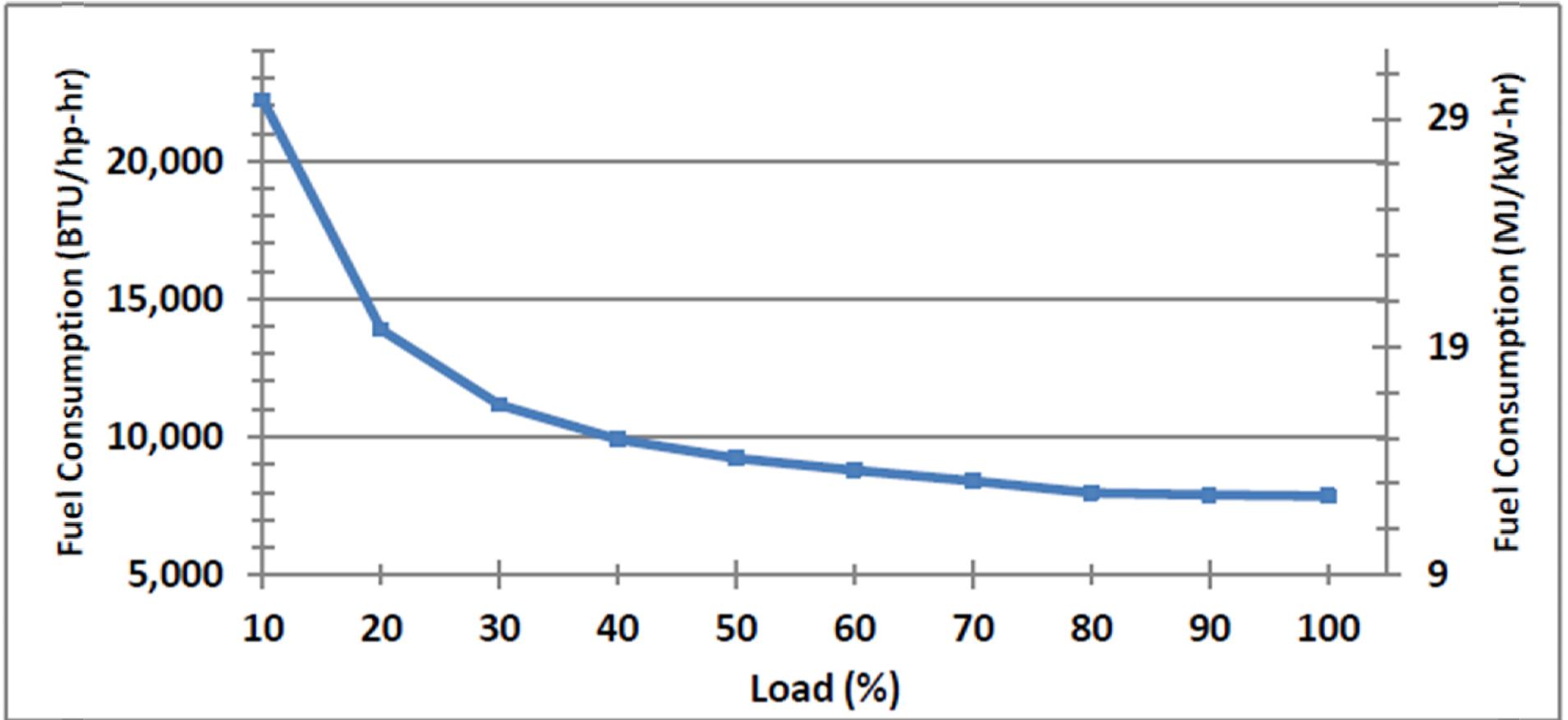
Stat	Ca	Service	Stag	RPM	Ps, barg	Pd, barg	Power, BHP	Flow, Sm3/h
<b>C1-Real Composition</b>								
	1	Service 1	2	1800.0	27.00	250.00	279.11	2483.829
	1	Service 1	2	1800.0	28.00	250.00	286.46	2602.467
	1	Service 1	2	1800.0	29.00	250.00	293.64	2721.943
	1	Service 1	2	1800.0	30.00	250.00	300.64	2842.249
	1	Service 1	2	1800.0	31.00	250.00	307.48	2963.372
	1	Service 1	2	1800.0	32.00	250.00	314.16	3085.323
	1	Service 1	2	1800.0	33.00	250.00	320.69	3208.072
	1	Service 1	2	1800.0	34.00	250.00	327.08	3331.631
	1	Service 1	2	1800.0	35.00	250.00	333.32	3455.967
	1	Service 1	2	1800.0	36.00	250.00	339.44	3581.083
	1	Service 1	2	1800.0	37.00	250.00	345.42	3706.969
	1	Service 1	2	1800.0	38.00	250.00	351.28	3833.617
	1	Service 1	2	1800.0	39.00	250.00	357.02	3961.015
	1	Service 1	2	1800.0	40.00	250.00	362.65	4089.156
	1	Service 1	2	1800.0	41.00	250.00	368.16	4217.875
	1	Service 1	2	1800.0	42.00	250.00	373.59	4347.622
	1	Service 1	2	1800.0	43.00	250.00	378.90	4477.924
	1	Service 1	2	1800.0	44.00	250.00	384.11	4608.911
	1	Service 1	2	1800.0	45.00	250.00	389.23	4740.592
	1	Service 1	2	1800.0	46.00	250.00	394.25	4872.938
	1	Service 1	2	1800.0	47.00	250.00	399.19	5005.950
	1	Service 1	2	1800.0	48.00	250.00	404.04	5139.609
	1	Service 1	2	1800.0	49.00	250.00	408.81	5273.896

Note: **BOLD** = Out of Limits, *ITALIC* = Special Appl.

APENDICE 4

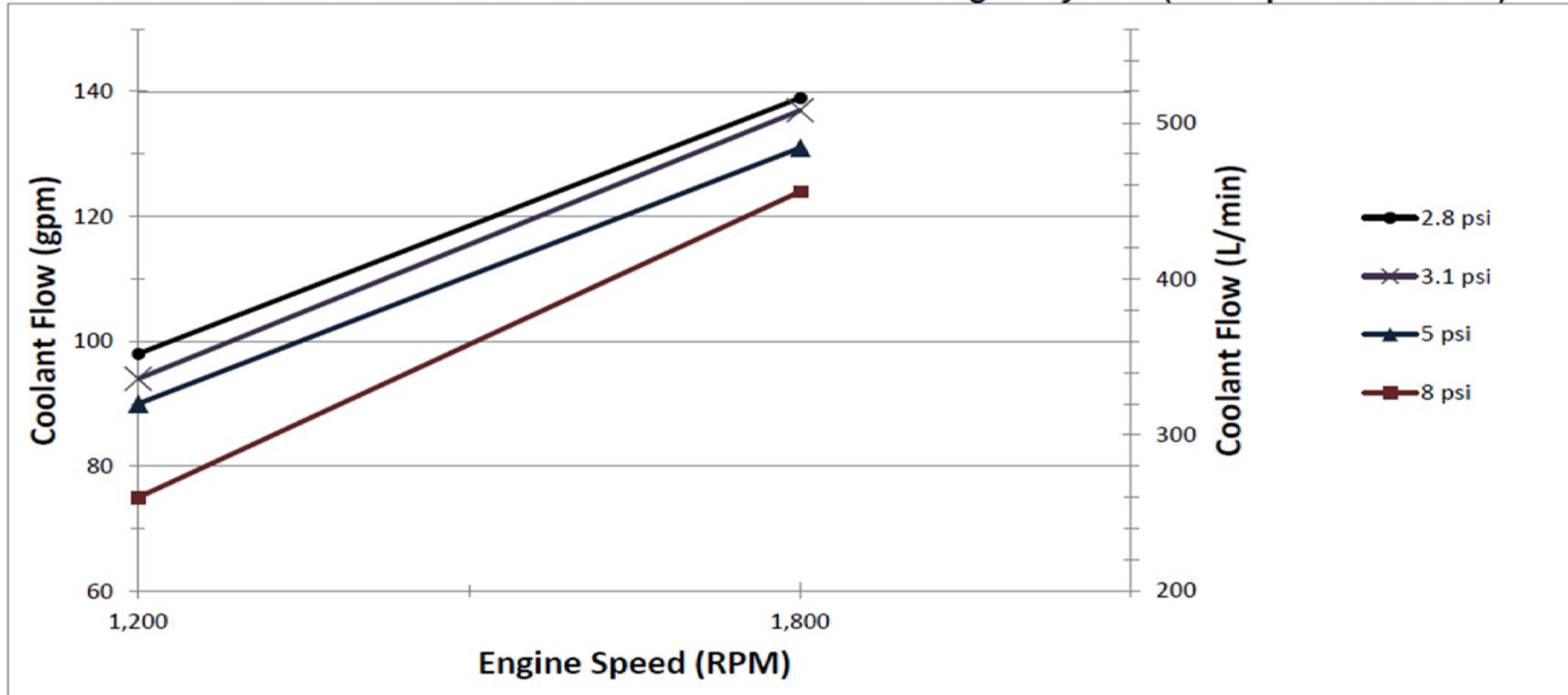


APENDICE 5



APENDICE 6

Thermostat out coolant flow vs. external restriction for engine system (with open thermostat)



System Restriction

Engine Speed	2.8 psi (19.3 kPa)		3.1 psi (21.4 kPa)		5 psi (34.5 kPa)		8 psi (55.2 kPa)	
	<i>gpm</i>	<i>L/min</i>	<i>gpm</i>	<i>L/min</i>	<i>gpm</i>	<i>L/min</i>	<i>gpm</i>	<i>L/min</i>
1,200	98	371	94	355.8	90	340.7	75	283.9
1,800	139	526.2	137	518.6	131	495.9	124	469.4

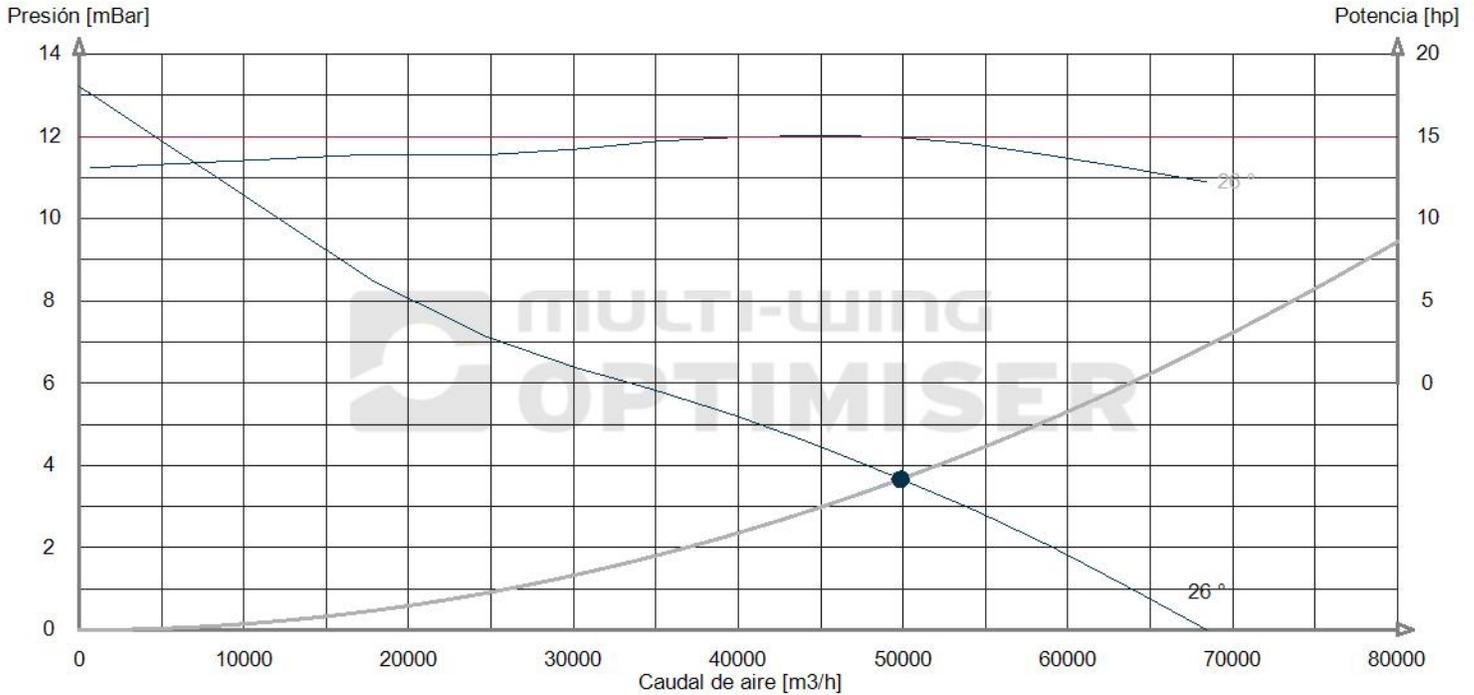


**1067/4-8/26°/PPG/5WL/Tp 12.7 mm**

FECHA: 10/01/2018

EMPRESA: -  
A LA ATENCIÓN DE: -

DE: GRUPO TECNIGAS  
Jesus Maravi



**INFORMACIÓN DE LA HÉLICE:**

Diaméto de la hélice: 1067 mm  
 Número de álabes: 4  
 Ángulo: 26 °  
 Material del álabes: PPG  
 Tipo de álabes: 5W  
 Rotación de la hélice: L

Pruebas realizadas de acuerdo al cumplimiento de las siguientes normas ANSI / AMCA 210-99 (ISO 5801, DIN 24163)  
 Los datos sonoros son cálculos y sólo sirven como referencia

**APLICACIÓN:**

Velocidad: 1750 RPM  
 Huelgo: 12.7 mm  
 Temperatura: 57 °C  
 Altura: 45.7 m  
 Densidad: 0.06646 lb/ft3

Cláusula de no responsabilidad  
 El factor de carga en Optimiser está basado en operaciones estáticas.

**OBSERVACIONES:**

GRUPO TECNIGAS  
 Pueblo Libre

Av. Rio Grande 205  
 -  
 21 Lima

+51 990671759 Teléfono  
 - Fax  
 Optimiser Versión: 10.0.0.88

jmaravi@grupotecnigas.com  
 http://www.multi-wing.com  
 10/01/2018 11:30:55 a. m.





**1067/4-8/26°/PPG/5WL/Tp 12.7 mm**

FECHA: 10/01/2018

EMPRESA: -  
A LA ATENCIÓN DE: -

DE: GRUPO TECNIGAS  
Jesus Maravi

**Actual punto de trabajo**

Caudal de aire	49900 m <sup>3</sup> /h	Presión total	4.94 mBar	Propagación	
Presión estática	3.67 mBar	Potencia	14.9 hp	Potencia acústica	106 Lw dB
Presión dinámica	1.28 mBar	Rendimiento	61 %		

**DATOS DE FUNCIONAMIENTO:**

Velocidad periférica:	321 ft/s
Temperatura:	57 °C
Velocidad del aire:	50.8 ft/s
Torque:	44.8 lbf ft
Fuerza axial:	99.4 lbf

**LIMITES DE OPERACIÓN DE LA HÉLICE:**

Velocidad periférica:	325 ft/s (1773 RPM)
Temperatura:	-30°C - 59 °C
Recorrido del diámetro:	562 - 1226 mm
Álabe, factor de carga:	97.2 %
Núcleo, factor de carga:	20.9 %
Potencia, factor de carga:	N.A. %

**Datos estáticos de la hélice:**

Momento de inercia:	9.4 lb ft <sup>2</sup>
Fuerza centrífuga del álabe:	1410 lbf
Factor de solidez:	0.17
Peso con buje estándar:	24.4 lb

**INFORMACIÓN DE LA HÉLICE:**

Diaméto de la hélice:	1067 mm
Número de álabes:	4
Ángulo:	26 °
Material del álabe:	PPG
Tipo de álabe:	5W
Rotación de la hélice:	L

Pruebas realizadas de acuerdo al cumplimiento de las siguientes normas ANSI / AMCA 210-99 (ISO 5801, DIN 24163)  
Los datos sonoros son cálculos y sólo sirven como referencia

**APLICACIÓN:**

Velocidad:	1750 RPM
Huelgo:	12.7 mm
Temperatura:	57 °C
Altura:	45.7 m
Densidad:	0.06646 lb/ft <sup>3</sup>

Cláusula de no responsabilidad  
El factor de carga en Optimiser está basado en operaciones estáticas.

**OBSERVACIONES:**

GRUPO TECNIGAS  
Pueblo Libre

Av. Rio Grande 205  
-  
21 Lima

+51 990671759 Teléfono  
- Fax  
Optimiser Versión: 10.0.0.88

jmaravi@grupotecnigas.com  
http://www.multi-wing.com  
10/01/2018 11:30:55 a. m.

