UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Cálculo de Indicadores de Uso Energético en la Industria. Caso de Estudio: Industria Automotriz

Leonardo Restrepo Flórez, I.deC.

Universidad Nacional de Colombia sede Medellín
Facultad de Minas
Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión
Medellín, Colombia
2018

Cálculo de Indicadores de Uso Energético en la Industria. Caso de Estudio: Industria Automotriz

Leonardo Restrepo Flórez, I.deC.

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ingeniería – Sistemas Energéticos

Director:
Carlos Jaime Franco Cardona, I.C., M.Sc., Ph.D.

Universidad Nacional de Colombia sede Medellín
Facultad de Minas
Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión
Medellín, Colombia
2018

A mi familia y mi novia, motores de inspiración para mi pogreso.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia que gracias a la beca de grado de honor subsidió todos mis estudios para poder finalizar satisfactoriamente mi posgrado, al profesor Carlos Jaime por ser el guía de este trabajo presentado y finalmente a la fábrica que me brindó toda la información necesaria para poder realizar los cálculos propuestos en este trabajo.

Resumen

El consumo de recursos ambientales en el mundo moderno ha venido aumentando de una forma significativa, uno de los principales usos de estos recursos es para la generación de diferentes fuentes de energía. La industria es uno de los sectores que más demanda tiene de estas fuentes, por lo tanto es necesario tener una medición de cuánto recurso se está utilizando para la fabricación de un bien o servicio. En este trabajo se presenta el análisis realizado para determinar y calcular diferentes indicadores de uso energético en el caso de la industria automotriz, calculando principalmente los indicadores de intensidad energética y la carga básica de electricidad. Se presentan de forma cíclica (día, semana, mes) los resultados obtenidos para el cálculo de los indicadores, a través de un servidor central de información de forma automática. Adicionalmente se analizan las diferentes fuentes de energía utilizadas en el proceso de ensamble del automóvil, con el fin de poder determinar la forma correcta de realizar las mediciones de los fluidos, teniendo presente que ya se tiene con una base instalada de medidores. La medición de los indicadores de uso energético permiten definir metas para la reducción de consumos de energía, basados en un historial de consumos y proponiendo actividades que promuevan el uso eficiente de las energías.

Palabras clave: intensidad energética, benchmark energy, eficiencia energética, industria automotriz .

Abstract

The consume of environmental resources in the modern world has been increasing in a significant way, one of the principal uses for this resources is the generation of different energy sources, the industry is one of the sectors with more demand of this sources, therefore is necessary to have a measure of how much resources are been used to manufacture a product or a service. This document shows the analysis performed to determinate and calculate a variety of energy indicators in the automotive industry, calculating mainly the indicators of energy intensity and basic electricity load. This indicators are presented in a cyclic form (day, week and month), using a central information server to make it automatically. Additional the different energy resources used in the process of automobile assembly are analyzed, with the purpose of determinate the correct way to measure the fluids, taking into account that there are measurement devices installed. The use of energy indicators allows to define goals for the reduction of energy consumption, based in the historical consume and purpose different activities that promote the efficient use of the energies.

Key Words: energy intensity, benchmark energy, energy effiency, automotive industry .

Contenido

Agradecimientos IV

Resumen V

Abstract VI

1 Introducción 2

2 Antecedentes 4

3 Marco Teórico 6
3.1 Indicadores de uso energético . . . 6
3.1.1 Intensidad energética . . . 7
3.1.2 *Benchmark energy factor* o potencial de rendimiento energético . . . 8
3.1.3 Carga básica de electricidad (talón de energía) . . . 9
3.2 Medición de fluidos energéticos . . . 10

4 Revisión de Literatura 12

5 Objetivos y Metodología 15
5.1 Objetivos . . . 15
5.2 Metodología . . . 15

6 Cálculo de Indicadores de Uso Energético 16
6.1 Sub procesos de interés en el ensamblaje del vehículo . . . 16
6.2 Indicadores de uso energético a calcular . . . 17
6.2.1 Indicadores de intensidad energética . . . 17
6.2.2 Indicadores de carga básica de electricidad . . . 19
6.3 Medición de energías . . . 19
6.3.1 Medición de energía eléctrica . . . 20
6.3.2 Medición de gas natural . . . 22
6.4 Presentación de los indicadores . . . 23

7 Resultados 25
7.1 Resultados intensidad energética . . . 27

7.2 Resultados talón de energía 31

8 Conclusiones y recomendaciones **34**

Referencias 38

1 Introducción

La eficiencia energética y la conservación de la energía son prioridades para todos los gobiernos a nivel mundial, lo cual ha motivado una intensa investigación para entender el consumo de energía y por lo tanto traducir este conocimiento en información significativa, con el fin de que los consumidores de energía asuman responsabilidades sobre lo consumido (Stankovic, Stankovic, Liao y Wilson, 2016). Sin embargo, el cálculo de la eficiencia energética dentro de la industria no tiene hasta el día de hoy una metodología que funcione al 100 % para todas las empresas del sector, es necesario llevar a cabo un análisis preliminar de los diferentes objetivos que tiene la compañía con el fin de definir un alcance, posterior a realizar esto, se procede a delimitar cuáles son los diferentes indicadores que más se ajustan a lo definido, teniendo en cuenta analizar que las diferentes fuentes de información que se requieren estén disponibles.

Uno de los mayores sectores que demandan energía en un país es el sector industrial, 34 % del total para el caso de Colombia (Martínez, 2009) , lo cual lo convierte en el segundo que más energía consume en el país. Las mejoras en la eficiencia energética son importantes para aumentar la productividad y reducir los impactos ambientales, el análisis de los indicadores de uso energético daría ideas acerca de las mejoras realizadas. Mejorar estos indicadores conduce a una mayor productividad económica y a su vez mejora las condiciones ambientales (Reddy y Ray, 2010).

Hasta el día de hoy no existe ninguna política colombiana que obligue a las diferentes empresas a tener objetivos de reducción de energía, sin embargo revisando el panorama mundial y la alta preocupación existente por los daños a la capa de ozono y el calentamiento global, se logra observar que en algunos países ya hay una reglamentación e incentivos que obligan a las compañías a colocarse metas de reducción de consumo energético. Para poder lograr estas metas es necesario definir políticas internas dentro de la compañía que apoyen los procesos de eficiencia energética, pues realizar este tipo de estudios y mejoras requiere de un alto presupuesto, mucho más si el nivel al que se desea llevar a cabo el estudio energético es hasta las máquinas.

Uno de los principales problemas en el cálculo de indicadores de uso energético se presenta en la cantidad de tiempo que se requiere para calcularlos, adicionalmente es un proceso que en la mayoría de los casos lo realiza un operador humano, el cual puede cometer múltiples

errores a la hora de realizar los diferentes procedimientos para llegar a los resultados esperados. Se busca entonces utilizar las diferentes herramientas de software existentes para poder determinar de forma automática los indicadores deseados.

El objetivo principal de este trabajo es determinar y calcular, de la mejor forma posible, diferentes indicadores de uso energético en la industria automotriz. Para esto se hará una revisión de literatura de los diferentes indicadores que se pueden calcular para las industrias y se delimitará el problema dependiendo de las diferentes fuentes de información disponibles.

Uno de los principales problemas a la hora de verificar el correcto cálculo de los indicadores, es la fiabilidad de la información, se debe garantizar que la información alimentada al sistema provenga de una fuente confiable y se encuentre correctamente parametrizada, por lo tanto es necesario realizar un estudio de cómo, cuándo y dónde la energía es consumida. Lo exhaustivo de este estudio depende de qué tan desagregado se deseen calcular los indicadores, teniendo en cuenta que al tener una información más detallada, se requiere de una mayor cantidad de recursos. Finalmente se desarrolla una plataforma en un software que permite la interacción en tiempo real con los diferentes cálculos de los indicadores y adicionalmente se podrán consultar históricos de los mismos.

Los diferentes indicadores de uso energético se calcularán en una industria ensambladora de automóviles, en la cual muchas de sus piezas ya vienen fabricadas y pre-ensambladas tanto de proveedores locales como internacionales, algunos de estos proveedores locales ocupan un espacio físico al interior de la empresa, sin embargo se debe de tener en cuenta que el costo energético de estas empresas y de todo tipo de material que sea suministrado del exterior de la compañía, no se asumirá en el cálculo, sino que los indicadores corresponden a toda la energía utilizada solamente por la fábrica en estudio.

Estructura del trabajo final

El presente trabajo final se divide en ocho capítulos, el capítulo uno (actual) presenta una introducción general de lo que se encontrará en el desarrollo de este trabajo; el capítulo dos expone un análisis de los antecedentes encontrados que enmarcan el desarrollo del tema seleccionado; en el capítulo tres se expone el concepto de los diferentes indicadores de uso energético encontrados y a su vez cuál es la forma como se debe de medir la energía consumida (marco teórico); el capítulo cuatro presenta un estudio de la revisión de literatura encontrada en la bibliografía; el capítulo cinco expone el objetivo general, objetivo específico y la metodología para dar solución a los objetivos planteados; en el capítulo seis se analizan los indicadores energéticos a calcular en la fábrica y los procedimientos necesarios para su cálculo; en el capítulo siete se presentan los resultados obtenidos; y finalmente en el capítulo ocho se desarrollan las conclusiones de lo obtenido y se proponen los trabajos futuros.

2 Antecedentes

A medida que ha pasado el tiempo se ha vuelto más importante calcular los costos reales de producir un producto. Interesa mucho calcular los recursos utilizados para llegar al bien final y por lo tanto verificar que con el tiempo se utilicen menos recursos para producir el mismo bien (procesos más eficientes). Para poder lograr la eficiencia en la producción, es necesario conocer cuánto recurso se necesita para producir un servicio y por lo tanto identificar posibles mejoras para reducir el uso del recurso.

Los indicadores de uso energético miden la cantidad de energía necesaria (recursos) para desarrollar una actividad o servicio (bien) (Martínez, 2009), por lo tanto a través de estos indicadores es posible calcular los recursos utilizados en el desarrollo de un producto. Sin embargo para poder obtener un cálculo correcto y preciso de los indicadores de uso energético es necesario desagregar lo más posible la medida de los recursos utilizados (Martínez, 2009).

Un problema que desarrolla este trabajo final es determinar cuáles son los indicadores de uso energético a calcular, pues existe una gran variedad de indicadores, sin embargo dependiendo del tipo de producción y de la forma de utilizar la energía es posible determinar los indicadores que mayor información le pueden brindar al sistema o a la producción.

Otro problema que se abarca con este trabajo es determinar qué tan complicado es medir los indicadores de uso energético de un producto, para poder obtener una línea base y en un futuro aplicar diferentes metodologías que ayuden a disminuir los indicadores. Algunos de los beneficios que se obtienen de disminuir los indicadores de uso energético son energía limpia, costos competitivos y entornos ambientalmente seguros (Kott y Kott, 2014), sin embargo para poder lograr disminuirlos, son necesarias diferentes actividades:

- Existencia de leyes que ayuden a cumplir acciones apropiadas para la disminución de los indicadores.
- Crear condiciones del mercado para el ahorro de energía.
- Regulaciones en el mercado energético, las cuales apliquen un aumento de la eficiencia energética en la industria.

Las principales causas de que existan malos indicadores de uso energético en el sector industrial son:

- Imperfecciones termodinámicas de los procesos.
- Excesiva intensidad energética en los procesos de producción.
- Uso ineficiente de los materiales reciclados.
- Poca eficiencia energética en los procesos.
- Mal dimensionamiento de los equipos.

Adicionalmente otro de los temas desarrollados en el presente trabajo es analizar cómo se está realizando la medición de las diferentes energías consumidas en la industria. Determinar si la forma en la cual se están midiendo es la correcta o cuáles acciones adicionales se podrían llevar a cabo para mejorar los valores obtenidos, pues uno de los principales problemas en el cálculo de indicadores es la información primaria suministrada, que en muchos casos, termina siendo errónea (International Energie Agency, 2015).

Sin embargo, los indicadores de uso energético no sólo se ven afectados por el consumo de energía en una industria, existen otros dos factores adicionales, los cambios en los niveles de producción y los efectos estructurales (de Nooij, van der Kruk y van Soest, 2003). Por lo tanto, para poder analizar los cambios en uno de los factores, es necesario que los otros dos factores se mantengan invariantes en el tiempo. Lo cual requiere de una técnica de descomposición para aislar los diferentes efectos. Sin embargo este tipo de análisis no se llevará a cabo en el desarrollo de este trabajo, pues se logra garantizar que los volúmenes de producción durante la toma de muestra de información permanecen constantes y adicionalmente no se realizará ninguna reforma estructural que afecte de forma significativa los consumos de energía de la planta.

En conclusión, se hace necesario el cálculo de los indicadores de uso energético en una fábrica, para poder determinar una línea base que mida cuánta energía se está consumiendo en la fabricación de un producto.

En el siguiente capítulo se mostrarán algunos indicadores de uso energético y cómo se deben de medir los diferentes fluidos energéticos.

3 Marco Teórico

3.1. Indicadores de uso energético

Los indicadores de uso energético esbozan un panorama del consumo de recursos de la compañía, relacionados directa o indirectamente con los volúmenes de producción (Coroiu y Chindris, 2014), son utilizados para poder establecer una línea base dentro del sistema y además permiten evaluar el desempeño de las diferentes acciones de optimización que puedan ejecutarse dentro de la industria, otro uso puede llegar a ser para modelizar y predecir el consumo de la planta para tiempos futuros (International Energie Agency, 2015). Cuando se implementan normas como la ISO50001, la cual está enfocada en los sistemas de gestión de energía, se requiere del uso de estos indicadores para poder comprender cómo, cuándo y dónde se están consumiendo los recursos energéticos.

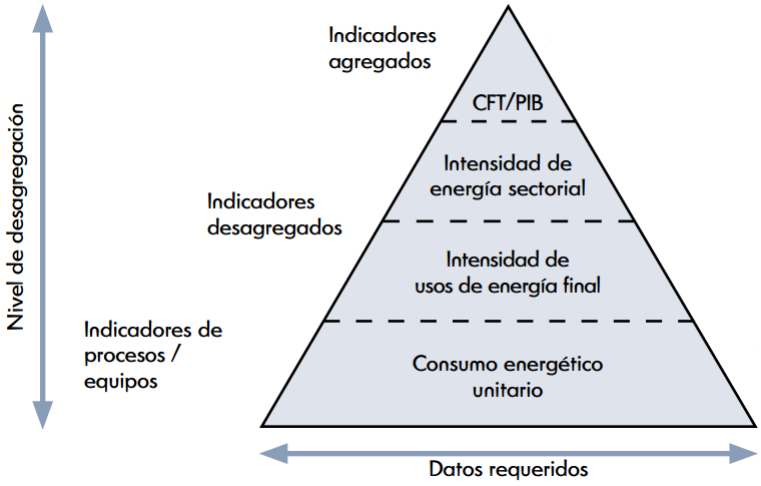

Figura 3-1: Pirámide de indicadores energéticos. Tomado de (International Energie Agency, 2015)

Sin embargo, uno de los puntos claves reside en saber escoger adecuadamente cuáles son los indicadores energéticos que más se ajustan al tipo de proceso que se tiene y además definir su nivel de jerarquía, qué tan profundo se quiere llevar a cabo el análisis. Por ejemplo, en (International Energie Agency, 2015) definen una pirámide de jerarquía, donde la parte superior de esta, define los indicadores que abarcan un todo, son más generales como el

CTF/PIB (Consumo Total Final / Producto Interno Bruto), mientras que los indicadores definidos en la base de la pirámide son para procesos o líneas de producción específica. La figura **3-1** muestra gráficamente esta pirámide. De esta gráfica se puede observar que a medida que se van desagregando más los indicadores, el volumen de información que se requiere es mayor, sin embargo al realizar un análisis del tipo unitario, es más optimo poder analizar los consumos específicos de la industria, con el fin de poder determinar de esta manera las diferentes acciones de optimización que se pueden llevar a cabo.

Realizando un estudio bibliográfico enfocado en los diferentes indicadores de uso energético que se calculan actualmente en la industria, se logran identificar principalmente los siguientes:

3.1.1. Intensidad energética

Es el indicador por excelencia para relacionar el consumo y la producción. Altamente calculado en cualquier industria y se puede definir de diferentes formas para estudiar el contexto deseado (International Energie Agency, 2015). La fórmula matemática para calcular este indicador es la definida en la ecuación (3-1) (Chontanawat, Wiboonchutikula y Buddhivanich, 2014) :

$$I_t = \frac{E_t}{Y_t} \tag{3-1}$$

Donde:

I_t: intensidad energética para el tiempo t (Joules/Producto).
E_t: energía utilizada en el desarrollo del producto para el tiempo t (Joules).
Y_t: cantidad de productos elaborados en el tiempo t.

La medición de la energía es colocada inicialmente en Joules, por ser la unidad al cual se puede llevar cualquier tipo de energía, sin embargo este indicador puede ser calculado, por ejemplo analizando la energía eléctrica, en unidades de kWh (Kilowatio hora). Más adelante se determinarán las unidades en las cuales será medido el indicador. Adicionalmente, se puede encontrar una nueva definición de intensidad energética si se tienen en cuenta todas las fuentes de energía dentro de una industria, obteniendo la ecuación definida en (3-2) (Bernard y Côté, 2005):

$$I_t = \frac{\sum_i^N [J_i * E_i t]}{Y_t} \tag{3-2}$$

Dónde:

J_i: número de unidades térmicas asociado a la fuente energética i.
$E_i t$: cantidad de la fuente energética i utilizada en el periodo de tiempo t.

En este trabajo se pretende calcular tanto la intensidad energética con respecto a una fuente de energía, como también la intensidad con respecto a la sumatoria de las diferentes fuentes de energía.

3.1.2. Benchmark energy factor o potencial de rendimiento energético

Su traducción al español podría ser "Factor de mejor práctica de energía", este indicador nacé utilizando la metodología *benchmark*, en la cual lo que se busca es intentar imitar la "mejor práctica"que se puede encontrar en la industria, con el fin de optimizar los procesos y así disminuir los consumos de energía (Pitis y Al-Chalabi, 2016). En la figura **3-2** se identifica el concepto que busca determinar este indicador:

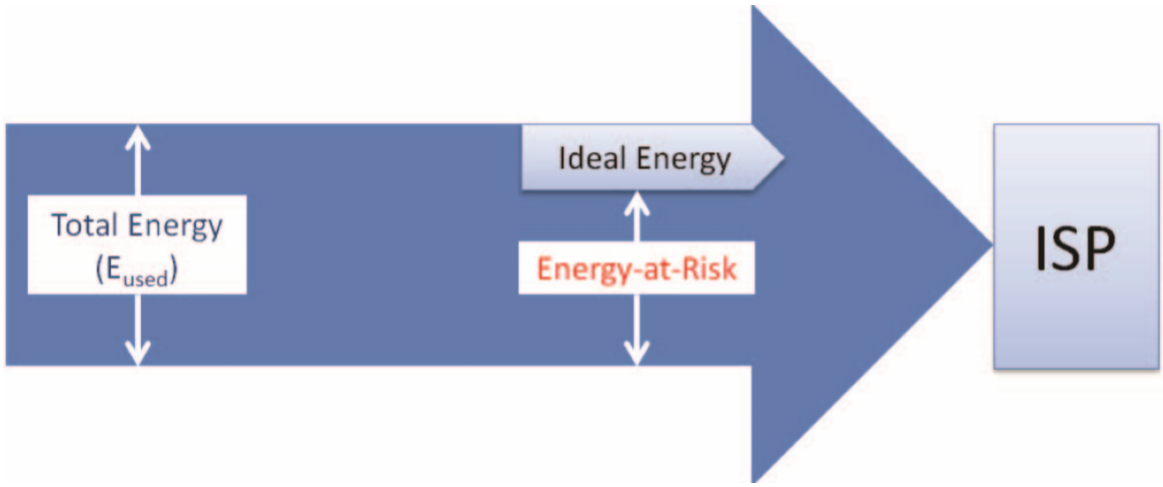

Figura 3-2: Flujo de energía en la industria. Tomado de (Pitis y Al-Chalabi, 2016)

El ISP del inglés *Industrial Systems and Processes* son los sistemas y procesos industriales, donde la energía real utilizada en el desarrollo de productos es generalmente mayor a la energía ideal del sistema, lo que genera la existencia de una "energía en riesgo". La definición matemática del indicador es la siguiente (Pitis y Al-Chalabi, 2016):

$$BEF_{system} = \frac{E_{used}}{E_{ideal}} \tag{3-3}$$

Dónde:

BEF_{system}: benchmark energy factor del sistema.
E_{used}: total de energía utilizada en el proceso.
E_{ideal}: total de energía ideal que se requiere para el proceso.

El problema de este indicador radica en calcular la energía ideal del proceso, pues para esto se deben de aplicar diferentes leyes de la física, y además, conocer y modelar en su totalidad el proceso de producción de la industria (Coroiu y Chindris, 2014). Sin embargo si se calcula este indicador, se puede fácilmente determinar en que parte del proceso de producción se tiene la mayor cantidad de energía desperdiciada y de esta manera poder aplicar diferentes optimizaciones en los lugares más críticos del sistema.

3.1.3. Carga básica de electricidad (talón de energía)

Con este indicador lo que se busca es determinar cuanta energía se está consumiendo una planta mientras no está en producción. Su definición matemática es la siguiente (E., S. y H., 2017):

$$T_e = \frac{C_{NoProd}}{C_{Prod}} \tag{3-4}$$

Dónde:

T_e: talón de energía.
C_{NoProd}: mínimo consumo en días de no producción.
C_{Prod}: máximo consumo en días de producción.

Interpretando la ecuación (3-4), se puede determinar que lo ideal en una industria es que el T_e tienda a cero, pues lo más deseable es que los días que no se realiza producción no se gaste ningún recurso energético, sin embargo, en la realidad este indicador prácticamente nunca será cero, pues los días de no producción en las industrias, se aprovechan principalmente para realizar mantenimientos preventivos o solucionar diversos problemas que sucedieron durante el transcurso de la producción, como por ejemplo, problemas generados por calidad en las piezas defectuosas. En otras ocasiones otro factor que impide que este indicador sea el menor posible, son los sistemas informáticos, ya que generalmente se decide que todos los servidores principales de información nunca deben de apagarse.

Cada empresa debe de determinar un porcentaje máximo de consumo permitido dentro de los días de no producción, y dado el caso tal que se supere, se debe entrar a analizar por qué

y cómo se superó el objetivo máximo permitido. Este indicador puede fácilmente ayudar a encontrar fugas en las tuberías, llaves o válvulas de suministro de algunos energéticos.

3.2. Medición de fluidos energéticos

Para que el cálculo de los indicadores energéticos sea el correcto y se pueda concluir efectivamente información acerca de ellos, se requiere que la medición de los recursos consumidos este desarrollada e implementada correctamente. El nivel de detalle necesario para la medición está directamente relacionado con la desagregación de los indicadores definidos, pues como se concluía en la sección anterior, si se desea una mayor desagregación, el volumen de información requerido es mayor, lo que se puede traducir en que se requieren más equipos de medición instalados para poder obtener toda la información necesaria.

Para poder llevar a cabo una correcta medición de los diferentes energéticos en la compañía, se requiere analizar cómo están definidos los flujos de suministro de cada uno de ellos, sin embargo, prácticamente todos los energéticos se pueden analizar de una forma similar. Lo primero es determinar la fuente principal de abasto del suministro, por ejemplo, en el caso de la energía eléctrica, la fuente principal será la acometida conectada del proveedor de energía hacia la subestación principal, donde en algunos casos puede existir más de una sola acometida. Posterior a esto es necesario conocer la distribución de esta energía hacia los diferentes sub procesos de interés. Nuevamente en el caso de la energía eléctrica, es identificar desde cuál subestación se están alimentando los diferentes procesos y analizar si absolutamente todas las cargas sí están conectadas desde el mismo interruptor principal. Esto con el fin de poder determinar si colocando un solo medidor en ese punto, ya se está abarcando todo el proceso de interés, o si es necesario colocar otro medidor donde existan otras cargas asociadas al proceso.

Otro punto a tener en cuenta, es por ejemplo, cuando de un mismo interruptor principal se están conectado diferentes cargas de procesos distintos, en este punto se pueden hacer dos cosas: la primera de ellas es intentar realizar una modificación de infraestructura para separar las diferentes cargas, esta sería la mejor opción, sin embargo es costosa y se requiere parar el proceso para poder hacer la modificación; la segunda es realizar mediciones indirectas de los consumos de cada uno de los procesos, con el fin de determinar porcentajes de consumo de cada uno de los sub procesos implicados, por lo tanto al utilizar un solo medidor, con los porcentajes determinados se calcula el consumo final de cada sub proceso.

Para el caso del gas es similar, se debe determinar la fuente principal de consumo, posterior a esto, determinar la distribución hacia los diferentes sub procesos de interés y finalmente determinar cuáles son los puntos de medición donde debe colocarse un instrumento, con el fin de poder determinar de forma desagregada el consumo. El punto diferente en el gas

radica en que el valor que se cobra finalmente al usuario depende del poder calorífico que este posea, el cual es variante en el tiempo. Por lo tanto para los medidores de gas se tiene un valor medido y un valor medido corregido, este último es calculado utilizando el valor del poder calorífico del momento.

En conclusión, se encontraron tres indicadores de uso energéticos generales, los cuales pueden ser desagregados según se desee, adicionalmente se realiza un análisis de cuáles son las consideraciones a tener en cuenta en la medición de los fluidos eléctricos. En el próximo capítulo se desarrollará una revisión de la literatura para observar cómo ha sido el desarrollo de los indicadores de uso energético a través del tiempo.

4 Revisión de Literatura

Como se ha comentado anteriormente, los cálculos de indicadores de uso energético son necesarios para poder realizar la evaluación de desempeño de una empresa. Juegan un rol importante para definir su nivel de eficiencia y efectividad. En las últimas décadas han existido múltiples estudios científicos donde se discute sobre medidas de la eficiencia energética, estandarizaciones, regulaciones, políticas, métricas y medición del rendimiento a nivel nacional (Xu, Karali y Sathaye, 2014) (May, Barletta, Stahl y Taisch, 2015) (Song et al., 2014). Uno de los primeros escritos encontrados que habla sobre indicadores energéticos fue en (Patterson, 1996), donde el foco de la investigación está determinado principalmente por la termodinámica. Logra definir indicadores físico-termodinámicos y económicos-termodinámicos, por lo tanto son indicadores basados en un estudio científico de los procesos de interés, aplicando en su mayoría las leyes de la termodinámica. Adicionalmente, estos indicadores fueron relacionados con su nivel de aplicabilidad visto desde el lado de la política, concluyendo que es necesario el desarrollo de políticas que promuevan el cálculo de indicadores de eficiencia energética.

Posteriormente podemos encontrar otra investigación donde nuevamente se realiza una relación entre los diferentes indicadores de eficiencia energética (en los cuales se pueden encontrar los indicadores de uso energético) y su alta relación con las definiciones políticas, sin embargo, esta vez el estudio está enfocado en el contexto industrial, este artículo realiza un estudio basado en tres principales características: factibilidad, confiabilidad y verificabilidad. Adicionalmente se realiza un análisis del nivel desagregación que se desea estudiar, se puede llegar a calcular la intensidad energética para un tipo de industria (nivel macro) o se puede llevar a cabo un análisis de en una línea de producción (nivel micro), la selección del tipo de estudio a realizar depende de los objetivos planteados y del nivel de análisis que se pueda desarrollar (Tanaka, 2008).

Un interesante artículo encontrado que potencializa el desarrollo de este trabajo es el de (Bunse, Vodicka, Schönsleben, Brülhart y Ernst, 2011), pues se plantea un análisis de como integrar la eficiencia energética con el manejo de la producción industrial. Se muestra un estudio de las diferencias encontradas entre lo desarrollado en la industria, versus, los diferentes estudios científicos realizados. En el informe se puede analizar que a través de la realización de procesos energéticos más eficientes a nivel industrial, se pueden obtener una gran cantidad de beneficios, divididos principalmente en tres aspectos: económicos (reduc-

ción de costos y recursos), ambientales (reducción de huella de carbono) y finalmente sociales (imagen internacional), sin embargo, para poder obtener estos beneficios es necesario realizar todo un estudio energético de la compañía, definir los indicadores de interés, para los cuales sea posible tener una información veraz y lo más instantánea posible, y adicional desarrollar un software que permita la interacción humana con los diferentes resultados obtenidos en tiempo real. La conclusión principal de este artículo es que se encuentran grandes brechas entre los diferentes estudios científicos con respecto a lo que se viene realizando a nivel industrial, en el papel se logran definir una gran cantidad de indicadores de eficiencia energética, los cuales no siempre son útiles para cada una de las industrias, se requiere de una estandarización y de un procedimiento para poder seleccionar de una forma correcta los indicadores a calcular.

Otro de los artículos encontrados relacionado con el tema abordado en este trabajo es en (Lindberg, Tan, Yan y Starfelt, 2015), en el cual se habla de los diferentes indicadores de rendimiento (no solo energéticos) en la industria, lo interesante es cómo se realiza el estudio de los mismos, el cual está basado en la metodología *"Bench"*. Lo que se propone inicialmente es determinar la mayor cantidad de variables que se encuentren relacionadas con el indicador de interés y realizar un histórico de al menos seis meses. Posterior a esto, evaluar la información almacenada, buscando cuándo durante ese tiempo se obtuvo el mejor valor del indicador y lograr entender cuáles fueron las razones por las cuales el sistema se comportó tan eficientemente. Esto con el fin de poder obtener un comportamiento deseado del sistema (el *"Bench"*) y por lo tanto intentar que toda la planta siempre se esté comportando en ese eficiente estado.

Dentro de la revisión de la literatura se encontraron dos artículos donde se expresan metodologías para la selección y el cálculo de los indicadores energéticos dentro de la industria. La primera de ellas es una metodología basada en siete pasos (May et al., 2015), donde se buscan definir los e-KPI (indicadores clave de rendimiento energético del inglés *energy key performance indicators*), es una metodología bastante robusta donde se tienen en cuenta múltiples factores existentes en una planta de producción, como lo son por ejemplo el mantenimiento de las máquinas, tanto predictivos como preventivos, lo complicado que a veces resulta el inicio de una planta de producción después de unas largas vacaciones o los sobrecostos que se conllevan al tener que realizar mejoras en la calidad de los productos ya realizados (re-procesos), adicionalmente realiza un análisis de los diferentes puntos de información que pueden existir dentro de la industria para poder captar información útil en el cálculo de los indicadores. La conclusión de este trabajo es que la metodología propuesta solamente es viable en empresas de gran tamaño, para las medianas y pequeñas sería bastante complicado el poder llevar a cabo esa metodología, adicionalmente como en varios de los artículos encontrados, uno de los principales problemas es la disponibilidad de la información y la inexistencia de herramientas que permitan visualizar y analizar cómo son los

flujos de consumo. La segunda metodología propuesta fue en (Schmidt et al., 2016), es una metodología que tiene dos ejes fundamentales los cuales están en constante intercambio de información: el primero de ellos se define como el "diseño del proceso", en el cual lo que se busca es la definición de los diferentes indicadores a calcular, para lo cual inicialmente se debe de determinar los objetivos estratégicos e identificar los equipos relevantes del proceso; el segundo eje se define como "fuentes de información del proceso", en el cual lo que se busca definir es la información necesaria para poder calcular los diferentes indicadores definidos en el primer eje. Adicionalmente en este artículo se definen algunas plantillas para poder determinar los diferentes indicadores de interés, en teoría son plantillas que pueden ser utilizadas en cualquier tipo de industria, sin embargo, el mayor problema que se encuentra nuevamente es que luego de definir los indicadores no es posible calcularlos, ya que al realizar el análisis del segundo eje no es posible determinar la información requerida. La conclusión principal es que la metodología propuesta funcionó a la perfección en un caso de estudio de una industria farmacéutica, y que sería posible realizar nuevas definiciones de plantillas para los indicadores si se tuviera la certeza de que existe una medición puntual para cada una de las máquinas presentes dentro de la industria.

Como conclusión general de la revisión de literatura realizada, se puede observar que existen y están definidos los diferentes indicadores de uso energético para la industria desde hace aproximadamente dos décadas, sin embargo el cálculo en cada industria es diferente. Es necesario definir las metas u objetivos que se quieren alcanzar para poder determinar cuáles son los principales indicadores que den información útil, sin embargo, el otro aspecto a tener en cuenta es que la información que se requiere para poder obtener los indicadores sí tenga una fuente de datos confiable y ojala en tiempo real. Finalmente es necesario el uso de algún software para poder mostrar la información en línea, este debe de tener la capacidad de poder comunicarse con las diferentes fuentes de información.

En el siguiente capítulo se mostrarán el objetivo general, los objetivos específicos definidos y adicional una breve descripción de la metodología llevada a cabo para la realización de este trabajo final.

5 Objetivos y Metodología

5.1. Objetivos

Con base a lo mencionado sobre el uso de la energía en la industria, los objetivos planteados en el presente trabajo final de maestría son:

Objetivo General

Calcular indicadores de uso energético del proceso de producción de un automóvil en una planta de ensamble.

Objetivos Específicos

- Determinar los indicadores de uso energético a calcular en el proceso de producción de un automóvil en una planta de ensamble.
- Proponer el modo de medición adecuado para las energías utilizadas en el proceso de producción de un automóvil en una planta de ensamble.

5.2. Metodología

Para poder llevar a cabo los objetivos planteados anteriormente, se desarrollarán las siguientes actividades: primero se realizará una definición de los diferentes subprocesos de interés que comprenden el ensamblaje de un automóvil, delimitando cuáles son los que se utilizan en la fábrica en estudio, luego se van a definir los indicadores de uso energético a calcular según la desagregación deseada y teniendo en cuenta que la información requerida para su cálculo sí sea posible obtenerla.

Posteriormente, para poder calcular los indicadores, se deben definir los puntos de medición de energía necesarios, realizando el estudio de los diferentes energéticos que existen en la fabricación del automóvil y seleccionando la correcta forma de medición. Finalmente se establece cómo se van a presentar los indicadores, teniendo en cuenta que todo el proceso se realizará automáticamente, mostrando los indicadores en tiempo real. Para poder determinar que los indicadores que se calculan a través de la plataforma sean los correctos, se realizarán unas comparaciones con el cálculo de indicadores de forma manual.

6 Cálculo de Indicadores de Uso Energético

Según lo planteado en los capítulos anteriores, para poder calcular los indicadores de uso energético es necesario definir cuatro aspectos principales: los sub procesos principales que se desean estudiar, los indicadores energéticos a calcular, la forma en la cual se medirán los consumos energéticos asociados a los indicadores definidos y finalmente el sistema que se encargará de mostrar la información en línea.

6.1. Sub procesos de interés en el ensamblaje del vehículo

El cálculo de indicadores de uso energético se llevará a cabo en una planta de ensamble de automóviles, en la cual existen cuatro sub procesos principales:

- **Embutición:** es el proceso en el cual se encargan de fabricar las diferentes piezas metálicas del automóvil, se desarrolla a partir de procesos de prensado. La planta de ensamble de automóviles a estudiar no cuenta con este proceso. Todas las piezas fabricadas en este taller son suministradas por proveedores locales o internacionales.

- **Soldadura:** en este taller se toman todas las piezas desarrolladas en el proceso de embutición y se soldan para fabricar el chasis y la carrocería. El principal consumo energético de este taller es la energía eléctrica.

- **Pintura:** como su nombre bien lo describe, es el proceso en el cual se encargan de darle color al automóvil, sin embargo, antes de poder pintarlo es necesario que el vehículo pase por una cantidad de procesos para poder garantizar la pintura en el automóvil. Sus principales consumos son la energía eléctrica (es el proceso que contiene los motores más grandes de la empresa) y adicionalmente es el único taller que requiere de gas.

- **Montaje:** es la última etapa del proceso de la fabricación de un vehículo, se encargan de instalar el resto de elementos a los automóviles: el motor, las llantas, el tablero de control, entre otros. Su consumo energético es solamente la energía eléctrica.

Sin embargo, para la correcta operación de los anteriores procesos, se requieren de servicios adicionales, los cuales también representan un consumo significativo de la compañía, estos son:

- **Servicios:** este sub proceso es el que se encarga de suministrar el aire comprimido, el cuál es fundamental para la operación de todos los procesos anteriores. Se alimentan los compresores, los cuales tienen un consumo significativo en la fabricación del automóvil.

- **Sistemas:** es el sub proceso que se encarga de todos los servicios de computo necesarios para la fabricación del vehículo, se posee una gran cantidad de servidores, los cuales permanecen encendidos las 24 horas del día los siete días de la semana.

6.2. Indicadores de uso energético a calcular

Anteriormente en el capítulo de marco teórico se encontraron tres principales indicadores de uso energético: intensidad energética, la carga básica de electricidad y el potencial de rendimiento energético. Este último indicador no se calculará en este trabajo, pues realizar una análisis termodinámico del proceso de ensamblaje de un vehículo es una labor bastante ardua, la cual requiere de un análisis a fondo de una gran cantidad de procesos, con el fin de estudiar la eficiencia de los subprocesos involucrados.

Este indicador también se puede calcular buscando el *Bench*, analizando cuáles son las razones por las cuales se está tan lejos de este. Sin embargo, al buscar en la literatura el consumo de energía por vehículo en las diferentes plantas de ensamblaje a nivel mundial, se llega a la conclusión que la planta en estudio es la que menos energía requiere para el ensamblaje de vehículos. Una de las principales razones por las cuales el consumo es tan bajo con respecto a otras compañías es porque la fábrica en estudio es abierta, no posee sistemas de calefacción o aires acondicionados, mientras que en otras partes del mundo, obligados por las condiciones climáticas y las diferentes estaciones en el año, se requieren plantas cerradas para poder tener los sistemas de climatización requeridos.

A continuación, se muestra cómo se calcularán cada uno de los indicadores energéticos según los subprocesos definidos.

6.2.1. Indicadores de intensidad energética

La definición de la intensidad energética es dividir el consumo sobre la producción, por lo tanto según los subprocesos definidos se tendrán los diferentes indicadores de intensidad energética:

- **Intensidad energética eléctrica en soldadura:** se sumarán los consumos de energía eléctrica referentes a este subproceso y se dividirá por la cantidad de automóviles fabricados.

- **Intensidad energética eléctrica en pintura:** se sumarán los consumos de energía eléctrica referentes a este subproceso y se dividirá por la cantidad de automóviles fabricados.
- **Intensidad energética eléctrica en montaje:** se sumarán los consumos de energía eléctrica referentes a este subproceso y se dividirá por la cantidad de automóviles fabricados.
- **Intensidad energética eléctrica en fábrica:** se sumarán los consumos de energía eléctrica de toda la planta y se dividirá por la cantidad de automóviles fabricados.
- **Intensidad energética gas en fábrica:** se sumarán los consumos de gas de toda la planta y se dividirá por la cantidad de automóviles fabricados. Cabe aclarar en este punto, como se dijo anteriormente, que el único taller que consume gas es Pintura, por lo tanto no es necesario calcular la intensidad energética de gas en ensamble o en soldadura, pues estos talleres no requieren de este energético para su operación.
- **Intensidad energética total en fábrica:** se sumarán los consumos de energía eléctrica y gas de toda la planta y se dividirá por la cantidad de automóviles fabricados.

Todos los indicadores de intensidad energética se calcularán en unidades de kWh por vehículo, el único indicador al cual se le debe realizar una conversión es al de gas, pues inicialmente se tendrá el indicador en m^3 y finalmente se obtendrá en kWh, el procedimiento para este cálculo se explicará más adelante, en la sección de medición de gas natural.

Lo segundo a definir en este indicador es la periodicidad para el cálculo del mismo. Se definen entonces tres periodicidades importantes: acumulado día actual, acumulado día anterior y acumulado mes. La idea es que con la periodicidad de los días se analice y se compare el comportamiento actual versus el comportamiento del día anterior, se deberían obtener valores bastante similares e intentar identificar razones por las cuales los indicadores, en el caso de no ser iguales, se encuentren desviados. Con el acumulado mes se busca analizar un todo, pues se está teniendo en cuenta tanto el consumo de los días de producción como el consumo de los días de no producción, lo que ocasionará que el indicador mensual siempre presente una desviación superior al indicador diario.

Una de las ideas que se intentó desarrollar a lo largo de este trabajo, era calcular la intensidad energética por modelo de vehículo ensamblado, sin embargo, en el proceso de ensamblaje no siempre se tiene un secuencial que permita el cálculo correcto de consumo de energías por modelo fabricado. Se intentó hallar el consumo del modelo de una forma indirecta utilizando sistemas de ecuaciones pero los resultados obtenidos siempre variaron para diferentes muestras de información, lo cual no permitió calcular a ese nivel de profundidad la intensidad energética.

6.2.2. Indicadores de carga básica de electricidad

Este indicador se calcula de forma semanal para cada uno de los subprocesos definidos anteriormente. Para poder obtener los valores máximos y mínimos de consumo, el proceso que se realiza es el cálculo hora a hora del consumo energético, el cual se compara con los valores máximos y mínimos registrados hasta el momento. Si en una hora se logró superar el valor máximo registrado, entonces este último consumo pasa a ser el nuevo máximo calculado. Por ejemplo, se tiene que el máximo consumo hora calculado hasta el momento para el proceso de soldadura es de 280 kWh, si a la siguiente hora se calcula un valor de 290 kWh, este último pasa a ser el máximo consumo hora. De la misma forma se realiza para los mínimos, cada hora se está verificando si el consumo actual es menor al mínimo registrado.

Finalmente el día lunes se congelan los valores máximos y mínimos registrados de la semana anterior, los cuales se utilizan para calcular el indicador de carga básica de electricidad y comienzan a registrarse los valores máximos y mínimos para la semana actual. El talón de energía estará definido para los siguientes subprocesos:

- **Talón de energía en Soldadura:** mínimo consumo hora dividido máximo consumo hora asociados al sub proceso de soldadura.
- **Talón de energía en Pintura:** mínimo consumo hora dividido máximo consumo hora asociados al sub proceso de pintura.
- **Talón de energía en Montaje:** mínimo consumo hora dividido máximo consumo hora asociados al sub proceso de montaje.
- **Talón de energía en Fábrica:** mínimo consumo hora dividido máximo consumo hora asociados al proceso completo del ensamblaje del vehículo. Se debe de tener presente que el cálculo de este indicador se realiza a través de la sumatoria de todos los medidores de la fábrica, no existe un medidor principal de todo el consumo de la empresa que esté conectado al sistema de monitoreo.

Es de vital importancia al inicio de cada semana estar revisando los valores obtenidos en los cálculos de este indicador, pues de superarse las metas establecidas, es más fácil realizar un análisis de cuáles son las posibles variables que ocasionaron un mayor consumo de energía en los días de no producción.

6.3. Medición de energías

Según los subprocesos definidos se debe de entrar a analizar los suministros de los dos energéticos existentes, la electricidad y el gas, con el fin de poder calcular todos los indicadores de uso energético identificados. El primero de ellos es más complicado pues es necesario

realizar un análisis exhaustivo del diagrama unifilar para poder determinar los diferentes puntos de medición necesarios según los indicadores definidos.

6.3.1. Medición de energía eléctrica

Estudiando el diagrama unifilar, se determinan nueve puntos de medición de energía eléctrica para abarcar el consumo de todos los sub procesos.

- **Soldadura:** se requiere colocar dos puntos de medición para abarcar en su totalidad el consumo eléctrico del taller.
- **Pintura:** se requiere colocar cuatro puntos de medición para abarcar en su totalidad el consumo eléctrico del taller. Sin embargo, uno de los puntos de medición se encuentra bastante retirado de la fábrica y no se logra obtener el presupuesto necesario para implementar una arquitectura que permita la gestión automática de la medición. Este punto que no se medirá representa aproximadamente un 10 % del total del consumo asociado al taller de pintura.
- **Ensamble:** se requiere de dos puntos de medición para abarcar en la totalidad el consumo eléctrico del taller. Cabe aclarar que inicialmente se tenía puesto un punto de medición para este taller que incluía un consumo del subproceso de pintura y a través de datos históricos se calculaba un porcentaje definido para cada uno de los dos talleres, sin embargo, se realizó un proyecto para independizar la medición de estos dos consumos, de esta manera ya existe un medidor para cada uno de los talleres. El otro punto de medición asociado a este taller se comparte con el subproceso de sistemas, no fue posible realizar una modificación en la medición para independizar los consumos por falta de presupuesto.
- **Sistemas:** se utiliza el mismo punto de medición del subproceso de ensamble. Este taller representa el 70 % de lo registrado en el medidor, por lo tanto ensamble representa el 30 % restante.
- **Servicios:** se utiliza un solo punto de medición para calcular el consumo total referente a este sub proceso.

Con estos nueve puntos de medición instalados se está cubriendo el 70 % de la base instalada total de la fábrica. Cabe recalcar que un 10 % de la base instalada representa el consumo de otras compañías que existen al interior de la empresa, las cuales se encargan de fabricar piezas para el ensamble del vehículo, sin embargo como se ha dicho a lo largo de este documento el consumo energético de estas piezas no se está teniendo en cuenta en el cálculo de los indicadores, por lo tanto existe un 20 % de la base instalada que no se está midiendo actualmente, pero que se espera que en el transcurso de este año se logre abarcar esta medición.

Dentro del proceso de medición de energía se debe tener en cuenta la correcta parametrización de los instrumentos que se estén utilizando. Para poder medir energía eléctrica es necesario utilizar los denominados transformadores de corriente y si se está midiendo en sistemas de media o alta tensión también se requieren de transformadores de voltaje. Para este caso todos los puntos de medida están ubicados en sistemas de baja tensión, lo que significa que solamente se están utilizando transformadores de corriente. Los tres principales parámetros a configurar en un medidor de energía son: la relación de transformación de los transformadores de corriente, la cual dependerá de la capacidad de corriente que soporte la acometida instalada en el punto de medición; el tipo de sistema que se está utilizando (en el caso de estudio es un sistema de tres fases, cuatro hilos); y la frecuencia de operación (solamente existen dos opciones 50 Hz o 60 Hz). Adicional se debe tener presente la correcta instalación de los transformadores de corriente, pues en el principio de medición de un equipo de consumo de energía eléctrica es fundamental la dirección de la corriente, ya que dependiendo de ésta se determina si el sistema medido está generando o consumiendo energía.

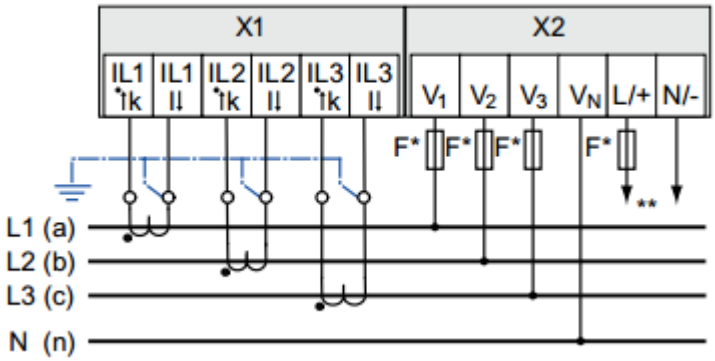

Figura 6-1: Instalación Medidor de Energía

En la figura **6-1** podemos observar cómo es el correcto conexionado de los instrumentos de medición de energía a instalarse. Los bloques de borneras X1 y X2 corresponden a las conexiones de corriente y voltaje respectivamente. En esta imagen también se logra observar que una de las conexiones de los transformadores de corriente se debe aterrizar a tierra, esto se realiza utilizando unas borneras especiales llamadas de Corto-Circuito, las cuales permiten seccionar la bornera cuando se requiera. Por lo tanto, mientras se está realizando el proceso de conexionado de los transformadores de corriente o cuando se requiere llevar a cabo un mantenimiento de los equipos de medición, lo ideal es cortocircuitar las borneras, con el fin de que la corriente generada por los transformadores logre desviarse hacia tierra, disminuyendo las posibilidades de un corto en el momento de desconectar los cables del instrumento. Dejar las borneras cortocircuitadas posterior a realizar los mantenimientos o instalaciones ocasionan un error en la medición, este error es bastante común encontrarlo cuando se ins-

talan por primera vez los equipos de medición de consumo eléctrico.

Otro punto importante a la hora de la selección de los equipos de medición es qué tipo de gestión o comunicación poseen los instrumentos. Un objetivo importante dentro del desarrollo de este trabajo es determinar en tiempo real los indicadores de uso energético, por lo tanto, se requiere que los equipos de medición estén en constante comunicación con el sistema de centralización de información. Para este caso los equipos poseen comunicación a través del protocolo Modbus TCP, el controlador principal del sistema se comporta como cliente y cada uno de los instrumentos de medida son servidores de información, cada cinco segundos aproximadamente se está consultado la información de consumo de cada medidor.

6.3.2. Medición de gas natural

Como se definió anteriormente, solamente existe un subproceso asociado que está implicado en el consumo del gas natural y es el taller de Pintura, sin embargo en toda la compañía existen algunos otros consumos de gas, por ejemplo, el restaurante de la compañía y las otras empresas que existen al interior de la fábrica. Sin embargo el sub proceso de pintura representa el 95 % del consumo total de gas natural. Lo que se ha realizado en el caso del consumo de gas, es instalar medidores en los equipos más importantes de la planta, con el fin de poder determinar el consumo de cada uno de estos procesos y a su vez revisar el consumo unitario por máquina, lo que ayudará en un futuro a identificar el pareto de consumo y así determinar acciones que impacten en la reducción del consumo de gas.

Los medidores instalados en el sistema de gas no poseen ninguna comunicación integrada, pero son capaces de enviar pulsos cada vez que se consumen una determinada cantidad de m^3, por lo tanto, lo que se realizó fue conectar los medidores a los controladores de proceso más cercanos. Estos controladores se encuentran todos en una red de comunicaciones industriales, la cual permite una interlocución con el servidor central de información.

Anteriormente se había definido que el único indicador de intensidad energética al cual se le debe realizar una conversión es al calculado en el gas natural, se requiere convertir de m^3 a kWh. La conversión se realiza de la siguiente forma:

- **Paso 1:** se debe de realizar una corrección del valor obtenido, esta corrección es explicada por la Ley de Boyle, la cual determina que el volumen de un gas depende de la presión y de la temperatura. Por lo tanto, el valor arrojado por el contador de gas se multiplica por un valor de corrección, determinado por la presión y la temperatura del sistema, sin embargo esta corrección se encuentra en constante cambio.
- **Paso 2:** se deben convertir los m^3 a una unidad térmica de energía (Joules, BTUs, entre otros), para esto se utiliza el poder calorífico del gas, el cual representa la energía

que puede liberar la unión química entre un combustible y un oxidante. En este trabajo se utiliza un poder calorífico de 35510 $\frac{kJ}{m^3}$, el cual equivale al promedio de los últimos 12 meses.

- **Paso 3:** por último se convierte de Joules a kWh, partiendo de la relación de que 1 kW equivale a $1\frac{kJ}{s}$. Por lo tanto, se divide el valor obtenido en el paso dos por 3600, obteniendo finalmente el consumo de gas en kWh.

6.4. Presentación de los indicadores

Uno de los principales objetivos en el desarrollo de este trabajo es obtener el cálculo de todos los indicadores energéticos de forma inmediata, pues un análisis de los diferentes trabajos bibliográficos encontrados y adicional una experiencia en las múltiples empresas en las cuales he trabajado, demuestran que el cálculo de estos indicadores es bastante tedioso, pues la información necesaria para el cálculo de los mismos proviene de múltiples fuentes de información. Por ejemplo realizar el cálculo manual del talón de energía requiere analizar los informes energéticos de los consumos de energía de todo un año, buscando los máximos y mínimos para cada una de las semanas. Una labor que se va a automatizar en el desarrollo de este trabajo.

Se utiliza un software SCADA existente en la compañía a estudiar para realizar todo el pre-procesamiento de la información, pues este sistema está en la capacidad de comunicarse tanto con los diferentes instrumentos y controladores que contienen la información de consumos, como con los diferentes servidores que contienen la información de producción. Son estos dos tipos de información los fundamentales para el cálculo de todos los indicadores de uso energético definidos anteriormente.

El dato proveniente de los sistemas de producción para encontrar la cantidad de vehículos ensamblados se encuentra en una tabla construida a partir de una base de datos SQL. Con el pasar del día esta tabla va obteniendo todo el secuencial de producción que está entrando al taller de montaje, lo cual equivaldría realmente a la producción que ha realizado pintura, sin embargo hasta el día de hoy no ha sido posible obtener los valores reales de producción para cada uno de los subprocesos en estudio. Por lo tanto este valor es el que se utiliza para calcular la intensidad energética en todos los casos. Realizando una comparación con respecto al valor real de producción se logra observar una cierta desviación de vehículos ensamblados, con un promedio de diferencia de $\pm$ 5 vehículos, los cuales pueden ser vehículos que tuvieron algún problema en el proceso de montaje y pasan a una etapa llamada recuperación. Actualmente se está trabajando con los responsables del informe diario de producción, para poder obtener en la tabla de SQL los diferentes valores de producción relacionados con cada sub proceso.

En el siguiente capítulo se presentarán los diferentes resultados obtenidos luego de desarrollar todos los pasos definidos anteriormente.

7 Resultados

Con el fin de validar que la información que se está presentando a través de la plataforma SCADA es verídica, se comparan los indicadores energéticos calculados de forma manual con respecto a los calculados de forma automática. La primera verificación que se realiza es la energía registrada por el comercializador (facturación), versus la energía registrada por los diferentes medidores de energía conectados con el servidor central de información. Se debe tener presente que por motivos de confidencialidad de los datos de la fábrica en estudio, los resultados que se muestran a continuación están multiplicados por un factor. La validación de la información se realizó durante tres meses, de febrero de 2018 a abril de 2018, el resultado es el siguiente:

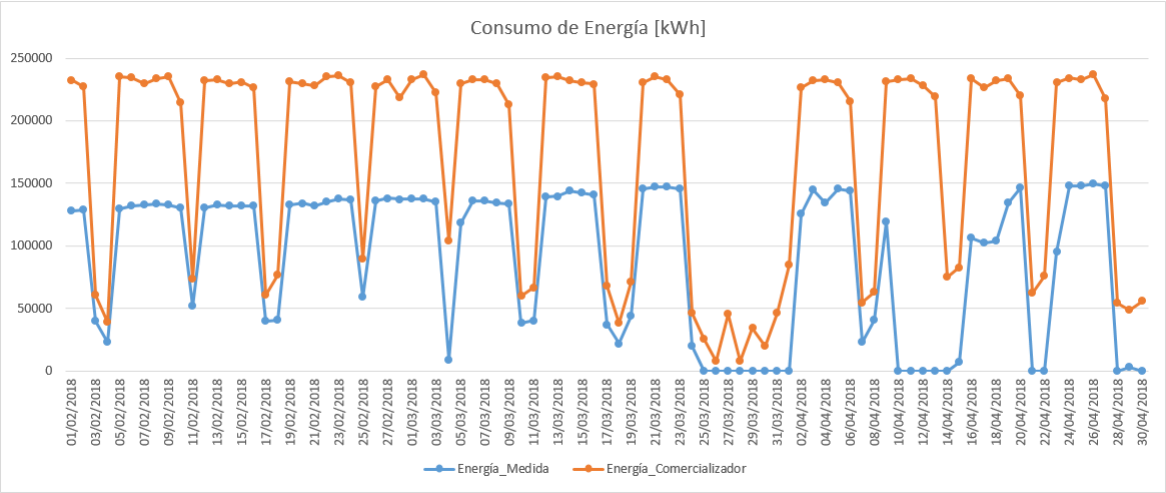

Figura 7-1: Comparación consumo de energía eléctrica. Elaboración propia

En la gráfica **7-1** se observa que existe una gran diferencia entre los registros que envía el comercializador de energía con respecto a los consumos que llegan al servidor central de información. Este era un resultado esperado, pues se tiene conocimiento de que hay una gran parte de los consumos que no se están teniendo en cuenta, sin embargo, la tendencia de los datos es bastante similar. Si se analiza en detalle la gráfica anterior, se logra observar un pequeño aumento en el consumo medido a partir del 20 marzo, en esta fecha se realizó una modificación en uno de los medidores, ya que uno de los transformadores de corriente asociado a este medidor estaba malo, generando una lectura errónea de consumo. Adicionalmente, existen dos rangos de fechas atípicas en la gráfica, la primera de ellas es entre el

25 de marzo y el 1 de abril, esta semana corresponde a la semana santa, fecha en la cual la planta salió a vacaciones, lo cual ocasionó que apagaran el servidor central de información, perdiendo todos los datos de consumo de esa semana. El segundo rango de fechas atípico es entre el 10 y 19 de abril, por estos días el servidor central de información tuvo que ser desconectado de los diferentes instrumentos de medida, pues existía un interferencia en la red de comunicaciones, lo cual estaba generando problemas en el ensamble de los vehículos. Otro análisis que se puede encontrar en esta gráfica es que muchos puntos atípicos se encuentran los fines de semana. El problema que se ha detectado es que algunos de los medidores de consumo energético o el servidor de información presenta desconexiones de la red de datos, lo cual ocasiona pérdidas de información.

Si se realiza el análisis con respecto al consumo de gas se obtiene el siguiente resultado:

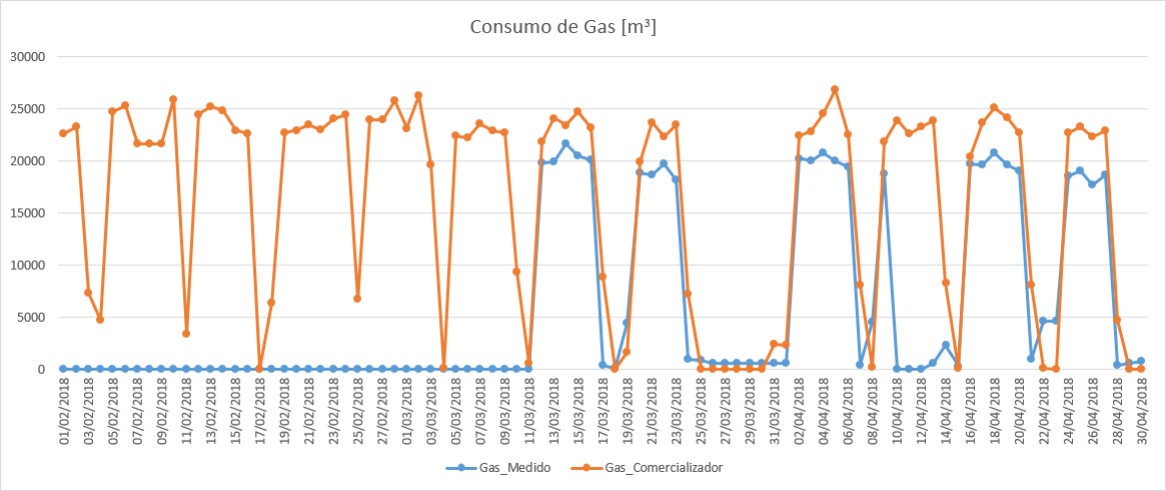

Figura 7-2: Consumo de Gas. Elaboración propia

A diferencia de la energía eléctrica, la medición del gas se comenzó a realizar a mediados del mes de marzo, sin embargo se puede observar que están mucho más cerca los valores que entrega el comercializador con respecto a lo medido si se compara con la energía eléctrica. Nuevamente se tiene presente que faltan ciertas cargas de consumo de gas por medir pero que no son tan significativas y que los datos más atípicos son los fines de semana, ocasionado por la pérdida de la comunicación. Adicionalmente los rangos de fechas atípicos se repiten por los problemas anteriormente mencionados. En conclusión la medición de gas que se está realizando es altamente confiable.

Finalmente el último factor a verificar para el cálculo de los indicadores propuestos, es la cantidad de vehículos ensamblados, la información en este punto se compara entre una información suministrada día a día en un informe de producción, el cual llamaremos “Vehículos Reales”, y la información que se toma del servidor central de información, la cual proviene

de un cálculo realizado a partir de un secuencial de operación. Esta última la llamaremos "Vehículos Cálculados". Estas son las diferencias encontradas:

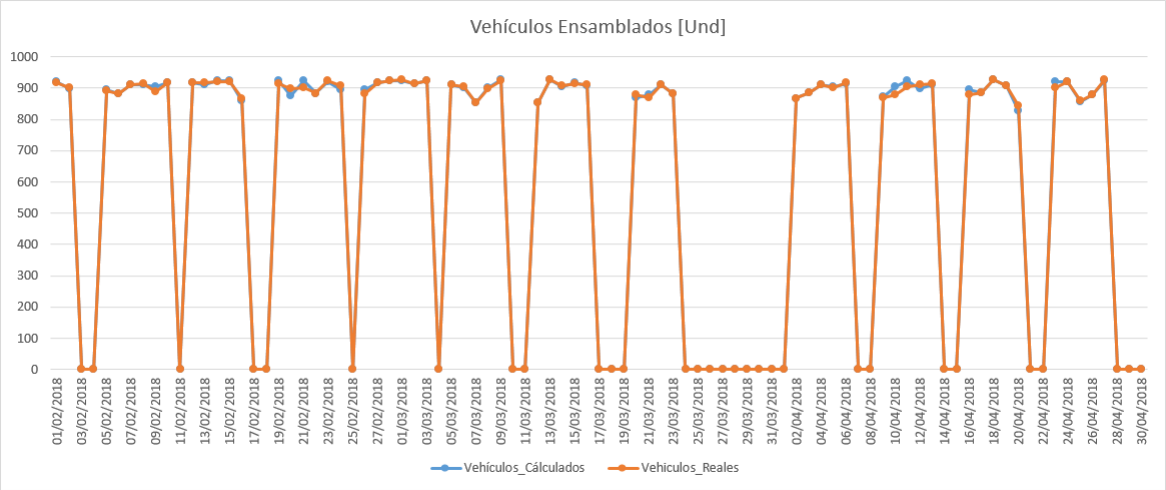

Figura 7-3: Comparación vehículos ensamblados. Elaboración propia

De la figura **7-3** se puede concluir que la información de vehículos ensamblados que se está tomando para realizar el cálculo de los indicadores es altamente confiable, solamente existen algunos datos dispersos. La razón por la cual existen este tipo de datos es porque el lugar de donde se toma el secuencial de operación no es el chequeo final de los vehículos fabricados, por lo tanto en algunas ocasiones, los vehículos, mientras se ensamblan hasta la parte final, presentan ciertos defectos que deben de ser corregidos y que por lo tanto no se contabiliza como ensamblado.

7.1. Resultados intensidad energética

Luego de observar como se comportan las tres variables más importantes para el cálculo de los indicadores, se procede a presentar el cálculo de la intensidad energética y del talón de energía. Iniciamos con el cálculo de la intensidad energética con respecto a los consumos generales de energía, gas y el total de energías. Es de esperarse, según las gráficas de resultados vistos inicialmente, que la intensidad energética de la energía eléctrica obtenida a través del servidor es un poco distante de la obtenida a través los valores de consumo obtenidos por el comercializador, la intensidad energética del gas si es mucho más cercana y se conoce el por qué no es igual con respecto a los valores del comercializador. Veamos el resultado en las siguientes gráficas:

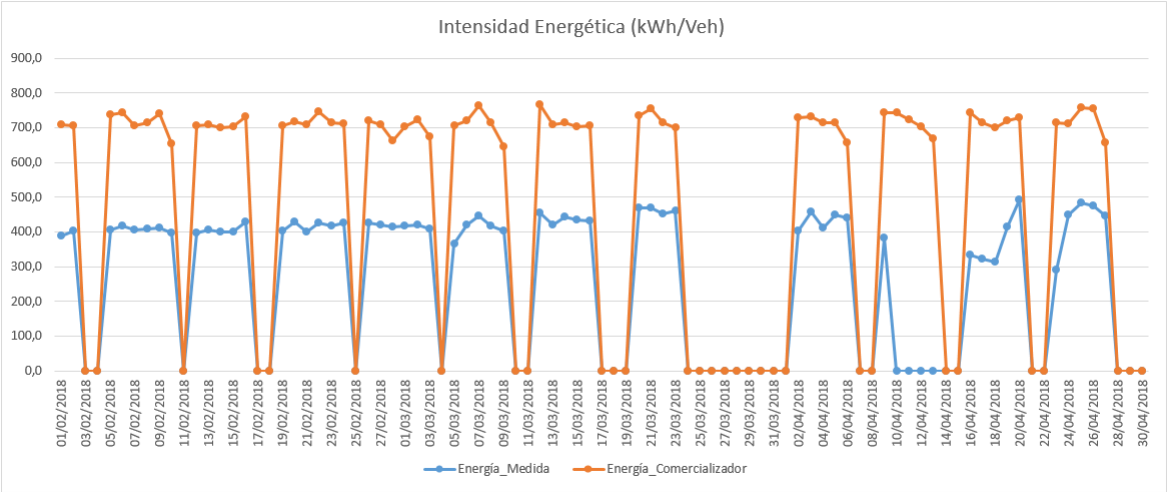

Figura 7-4: Intensidad energética energía. Elaboración propia

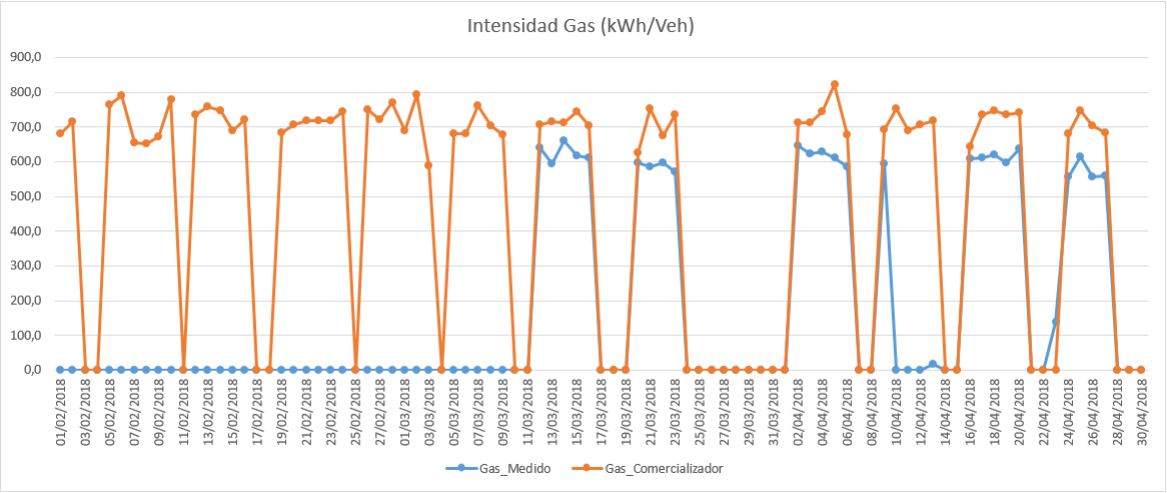

Figura 7-5: Intensidad energética gas. Elaboración propia

Analizando las gráficas **7-4** y **7-5** efectivamente se obtienen los resultados esperados, finalmente la gráfica obtenida de la sumatoria de las energías se espera que inicialmente esté un poco distante porque no se tenían los datos de consumo de gas, pero luego de mediados de marzo el valor se debe aproximar muchísimo más con respecto al real obtenido. Adicionalmente se deben observar las dos semanas atípicas de información. Veamos el resultado:

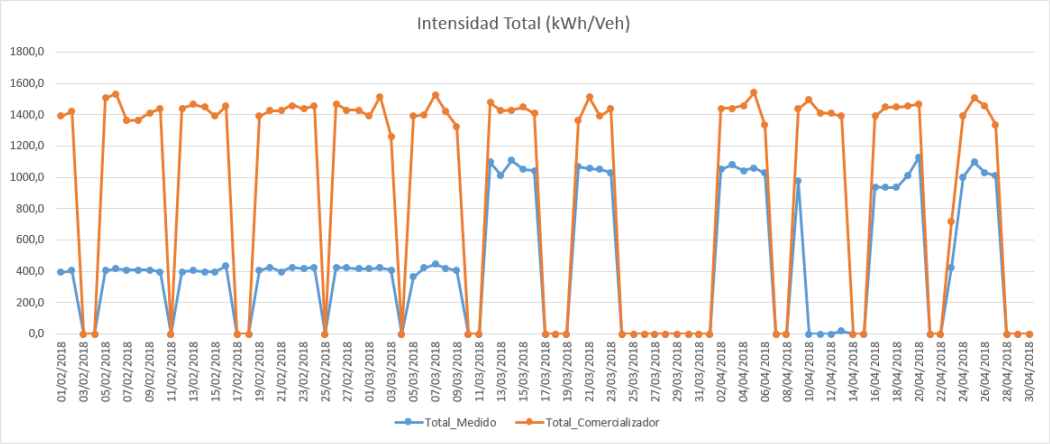

Figura 7-6: Intensidad energética total. Elaboración propia

Nuevamente se obtienen los resultados esperados. Los indicadores de intensidad energética que faltan por calcular son los relacionados con cada uno de los subprocesos, estos se compararon con los cálculos realizados de forma manual. Cabe recalcar que la información suministrada para los cálculos de forma manual depende de un factor humano, el cual día a día a la misma hora se da un recorrido completo por la fábrica anotando los valores de los diferentes contadores de energía o de gas, la principal ventaja de continuar realizando este procedimiento es que existen algunos instrumentos de medida que no poseen ningún canal de comunicación, que solamente son indicadores o en algunos casos, instrumentos que por motivos de infraestructura no es posible comunicarlos con el servidor central de información. Sin embargo, su principal desventaja es que en repetidas ocasiones el personal encargado de tomar estos datos tiene múltiples funciones a realizar, por lo tanto la hora a la cual se toma la información no siempre es la misma, o en el peor de los casos la persona encargada olvida registrar algún dato de un contador, lo que ocasiona problemas en la toma de datos. Los resultados obtenidos son los siguientes:

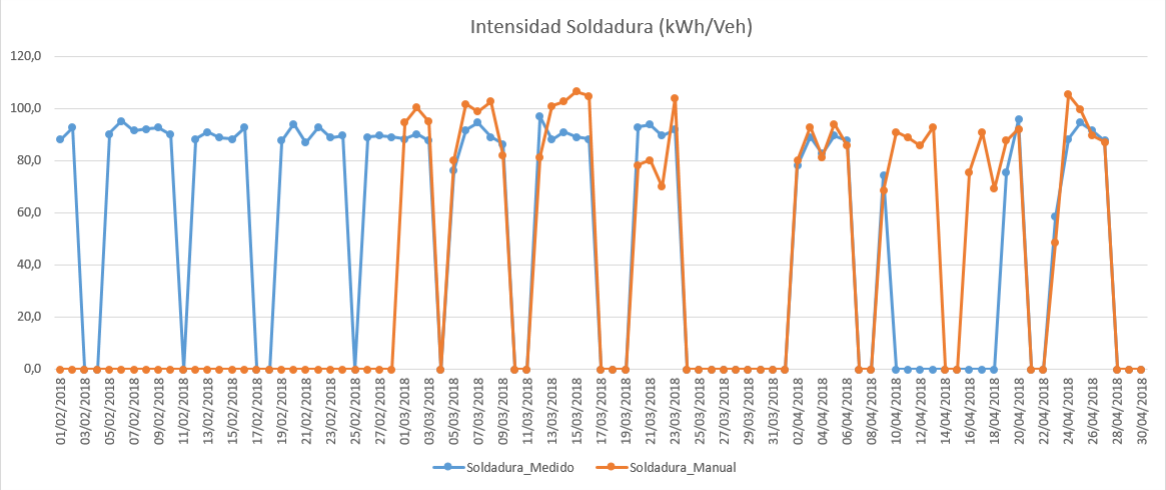

Figura 7-7: Intensidad energética soldadura. Elaboración propia.

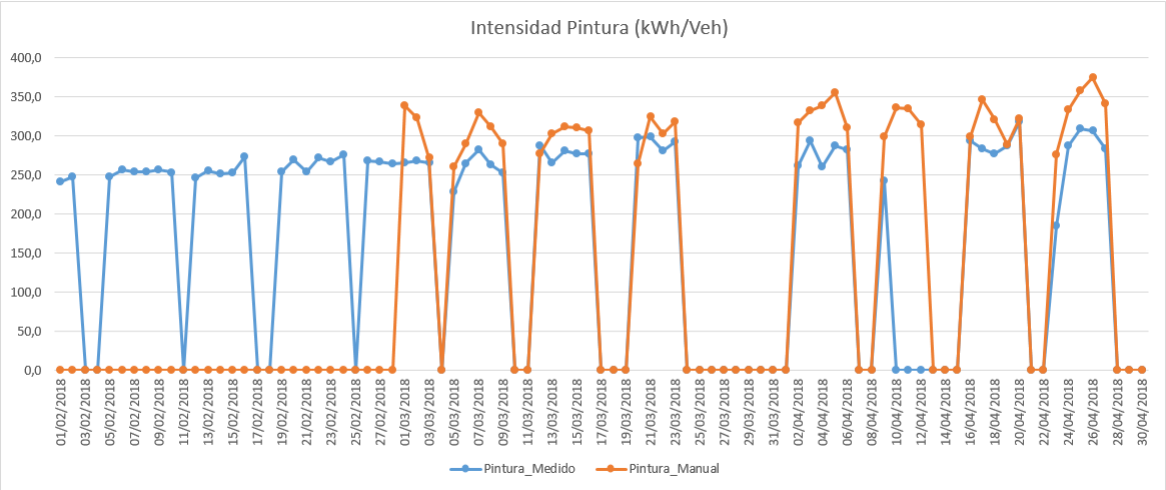

Figura 7-8: Intensidad energética pintura. Elaboración propia.

Cabe recalcar que el cálculo del indicador de forma manual se comenzó a realizar a partir del mes de marzo. La intensidad energética por subproceso mas ajustada es la de la gráfica **7-7**, perteneciente al taller de soldadura. Inicialmente estaba un poco diferente pero era porque en el cálculo manual se estaba teniendo en cuenta una carga no relacionada a este sub proceso. Posterior a este el segundo más ajustado es el de la figura **7-8**, en el cual se tiene conocimiento que hace falta una carga por llevar al servidor central de información. Finalmente el sub proceso de ensamble el cual se visualiza en la gráfica **7-9** presentó un significativo cambio después de la semana santa, pues se aprovechó esa parada de planta para separar las cargas que la subestación tenía con el sub proceso de pintura. La conclusión de estos resultados es que aunque todavía faltan cargas por medir, se tiene conocimiento

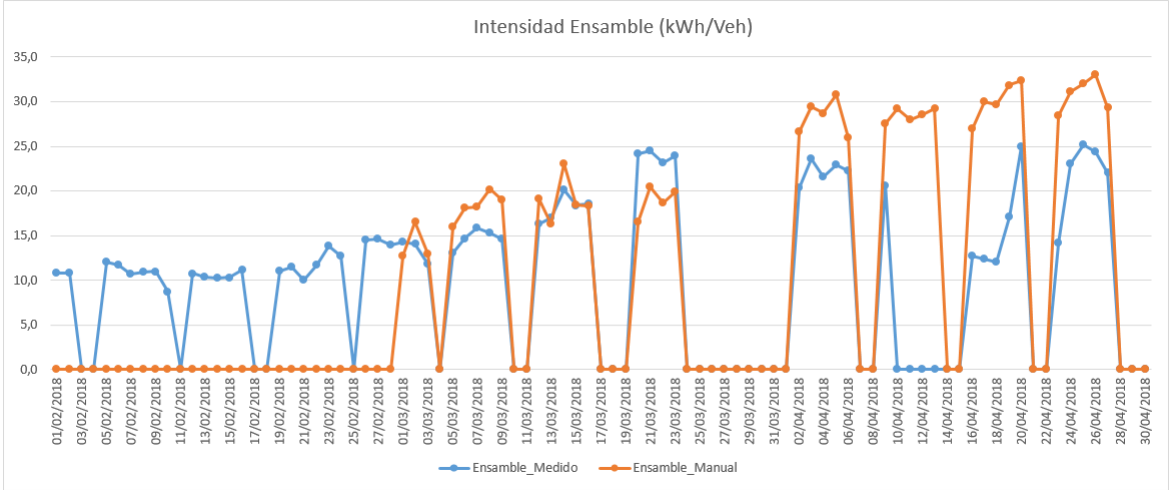

Figura 7-9: Intensidad energética ensamble. Elaboración propia.

de las tareas futuras a realizar y a su vez el indicador de intensidad energética esboza un panorama de cuales son los consumos que se están presentado en el proceso de ensamblaje del vehículo.

7.2. Resultados talón de energía

Los resultados obtenidos con respecto al cálculo del talón de energía son los siguientes:

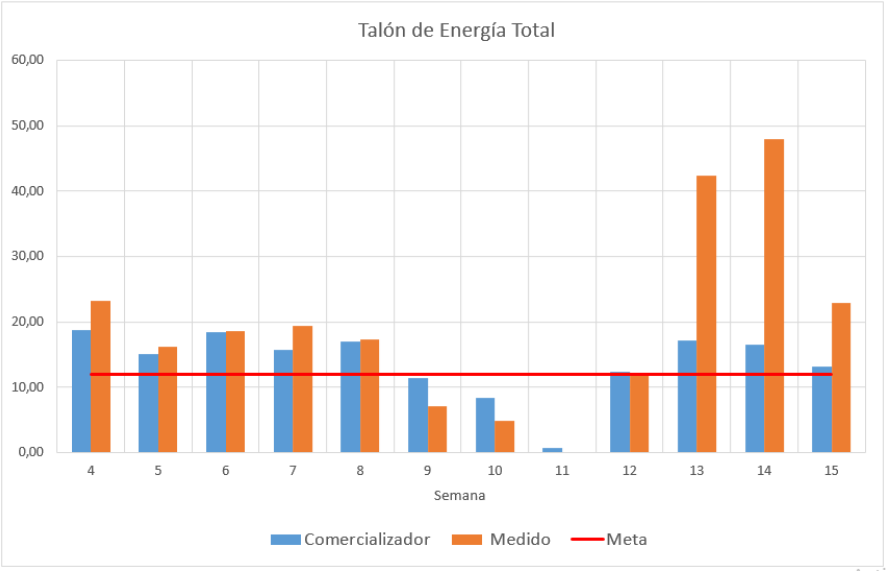

Figura 7-10: Talón de energía total. Elaboración propia.

En la gráfica se presenta el talón de energía calculado utilizando los datos del servidor central ("Medido") y utilizando los datos del comercializador ("comercializador"). De la semana cuatro a la doce se logra observar que los resultados obtenidos son bastante similares, la diferencia pronunciada en las semanas trece y catorce se debe a los problemas de la red de comunicación hablados anteriormente. La meta planificada para la compañía es un talón máximo del 12 %, por lo tanto, es necesario entrar a revisar en detalle cada uno de los sub procesos, pues no se está cumpliendo la meta propuesta. La gráfica de cada uno de los subprocesos es la siguiente:

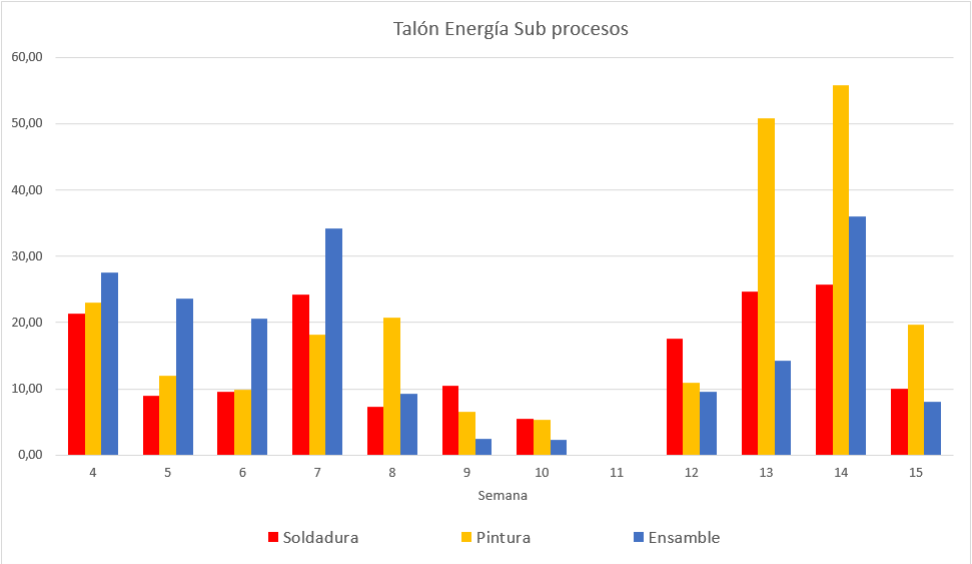

Figura 7-11: Talón de energía sub procesos. Elaboración propia.

De la gráfica se puede observar que en las semanas cuatro y siete existieron altos consumos en toda la planta y al realizar un análisis de lo sucedido en estas dos semanas se realizaron trabajos de recuperación en todos los talleres, lo que explica el alto consumo de energía. En la semana cinco y seis sólo se presenta un alto consumo en el subproceso de montaje, indagando nuevamente nos encontramos que estas semanas fueron de recuperación sólo en este taller, lo cual explica este comportamiento. En las semanas ocho y quince se encuentran comportamientos atípicos del taller de pintura, los cuales no fue posible explicarlos, pues no se encontraron actividades programadas para esas semanas, lo que pudo ocurrir fue que de pronto dejaron algún sistema encendido durante todo el fin de semana.

En conclusión, con respecto a los resultados obtenidos del talón de energía, es que los datos suministrados por el servidor de información tienen la tendencia del talón calculado por los datos del comercializador, por lo tanto, son fiables para mostrar la operación de la fábrica. Adicionalmente con los talones generados por taller es posible analizar más a fondo en cual de los subprocesos se generó más consumo de energía y por lo tanto intentar dar una

explicación del por qué el sistema está consumiendo más de lo normal, con el fin de poder generar acciones de mejora para reducir los consumos de energía.

8 Conclusiones y recomendaciones

A través de este trabajo final se logra plantear el procedimiento desarrollado para calcular algunos indicadores de uso energético en una planta de ensamble de vehículos, los cuales fueron calculados de forma automática a través de la comunicación con las principales fuentes de información y presentados en tiempo real usando una plataforma SCADA. Los indicadores calculados se están utilizando actualmente para verificar la correcta operación y consumo de los subprocesos definidos y adicionalmente se está trabajando en nuevos proyectos que ayuden a abarcar la medición del 100 % del consumo de los diferentes energéticos utilizados en la planta.

Otro de los aspectos a destacar que se encontraron en el desarrollo de este trabajo es que la fábrica en estudio es la que menos energía utiliza para el ensamblaje del vehículo, con respecto a la información encontrada de otros fabricantes a nivel mundial. Se realiza un análisis de los motivos por los cuales la compañía presenta tan buen desempeño en el cálculo de la intensidad energética y se encuentran dos desvíos principalmente. El primero de ellos es que muchas de las piezas que se utilizan en el ensamble del vehículo son producidas por proveedores locales o importadas por algunos proveedores internacionales. El consumo de energía asociado a la fabricación de estas piezas no está siendo tenida en cuenta para el cálculo de la intensidad energética y el segundo desvío principal es que la fábrica en estudio no tienen la necesidad de tener sistemas de calefacción, pues por la ubicación geográfica no se cuentan con estaciones climáticas ni tampoco con grandes variaciones de la temperatura que obliguen a la instalación de este tipo de sistemas. Sin embargo cabe recalcar que dentro de la empresa se han ido desarrollando múltiples proyectos para la disminución de energía, como lo es el cambio a luminaria LED o la utilización de quemadores de alta eficiencia y que actualmente se está pensando en nuevos proyectos como lo es compresores de alta eficiencia o generación de energía a partir de biomasa.

Las principales debilidades encontradas en el desarrollo de este trabajo son:

- Se requiere que la fiabilidad de las redes de comunicación de los equipos sean lo bastante óptimas para poder garantizar la información suministrada. Continuamente se presentaron diferentes fallos, los cuales ocasionan malas mediciones que conllevan finalmente a calcular indicadores erróneos. Algunos de los fallos corresponden a manipulaciones humanas que se pueden mitigar, como por ejemplo apagar los servidores de información

los días de no producción, o apagar los equipos necesarios para garantizar la correcta comunicación entre un instrumento de medida y la plataforma principal de datos.

- Se dificulta de gran forma obtener mediciones que correspondan al mismo valor de facturación de los diferentes comercializadores de energía. Una de las principales razones es que el medidor utilizado por el comercializador es un equipo mucho más preciso y que por temas de presupuesto no es posible instalar este tipo de medidores en todos los puntos de interés. Adicionalmente en el caso específico de la energía eléctrica, la medición que realiza el operador del servicio la hace en media tensión, mientras que las mediciones que se realizan actualmente en los diferentes subprocesos son en baja tensión, lo cual trae consigo una pérdida relacionada a la eficiencia de los transformadores de potencial. Finalmente, otro punto que afecta la cercanía de los valores entre lo medido y lo facturado es que no se está midiendo el 100 % de la capacidad instalada de la fábrica.

- Actualmente no se logra obtener un valor de producción de los vehículos realizados en cada uno de los subprocesos de interés, sino que se está utilizando el valor ensamblado total. Se requiere continuar trabajando con las personas encargadas de esta información para poder suministrar la información real de producción. Esto permite que los indicadores calculados sean más precisos e informen de la situación verídica de cada uno de los sub procesos.

Con respecto al cumplimiento de los objetivos se tienen las siguientes conclusiones:

Objetivo General
Calcular indicadores de uso energético del proceso de producción de un automóvil en una planta de ensamble.

Como se comentó anteriormente, se están calculando dos indicadores de uso energético, el primero de ellos es el de intensidad energética. Este esboza la información de cuánto es el consumo de los fluidos energéticos utilizados en el ensamble de un vehículo, el cual se calculó en diferentes subprocesos de operación de la fábrica y a su vez en diferentes periodicidades que permiten analizar diferentes factores de operación de la compañía. Adicionalmente se calculó el indicador del Talón de energía, el cual está siendo utilizado para garantizar que los días de no producción efectivamente se cumplan las metas de consumo establecidas, pues el consumo energético en un día donde no se producen vehículos, representa un gasto muerto para la compañía.

Objetivos Específicos

- *Determinar los indicadores de uso energético a calcular en el proceso de producción de un automóvil en una planta de ensamble.*

  En el capítulo del marco teórico se definieron los principales indicadores de uso energético que se calculan en las industrias, sin embargo, al entrar a analizar la fábrica de ensamble en estudio en el capítulo de la metodología, se determinaron cuáles de ellos serían los indicadores que se calcularían. El único indicador que no se calculó fue el indicador de potencial de rendimiento energético, pues para poder calcularlo se requiere de un análisis termodinámico exhaustivo del proceso de ensamble de un vehículo, el cual no fue posible realizarlo en esta etapa del trabajo.

- *Proponer el modo de medición adecuado para las energías utilizadas en el proceso de producción de un automóvil en una planta de ensamble.*

  A través del marco teórico y de la metodología desarrollada se estuvieron analizando cuales eran los puntos de medición más óptimos para los sub procesos definidos, utilizando el diagrama unifilar eléctrico o el sistema de distribución de gas. Una de las principales virtudes de este trabajo es presentar la información de forma automática a través de la plataforma SCADA, por lo tanto, uno de los puntos fuertes que se tuvieron en cuenta en el proceso de instalación de los equipos de medida, era que tuvieran la posibilidad de suministrar la información al servidor central de datos. Adicionalmente se analizaron las parametrizaciones que debían de tener los medidores de energía y las conversiones necesarias para convertir el valor del m^3 del gas en unidades de kWh.

Con el desarrollo de este trabajo quedan algunos trabajos pendientes por realizar:

- Uno de los principales trabajos a realizar es continuar conectando el resto de capacidad instalada de la fábrica que no se está midiendo, y también dividir las cargas de algunos de los subprocesos que comparten el mismo interruptor principal, con el fin de garantizar que todas las medidas que se estén realizando correspondan en su totalidad al mismo sub proceso. Adicionalmente con el desarrollo de esta actividad cada vez los valores medidos al interior de la compañía serán más cercanos al valor de facturación de las empresas comercializadoras.

- Realizando una evaluación más exhaustiva dentro de la compañía se encontraron algunas normas y estándares de operación interno que no solamente tenían en cuenta los indicadores energéticos calculados en este trabajo, sino que se describen otros indicadores más específicos de cada uno de los talleres principales, por ejemplo para el sub proceso de soldadura se debería de calcular el indicador de consumo de energía

dividido la cantidad de puntos de soldadura aplicados, o para el proceso de pintura se define el consumo de energía dividido la cantidad de m^2 pintados, estos indicadores hacen parte de la familia del indicador de intensidad energética, pues evalúan el consumo de los energéticos con respecto a una unidad de producción. En el momento en el que se encontraron estos nuevos indicadores no se contaba con el suficiente tiempo para calcularlos y presentarlos en este trabajo de una forma correcta y completa, sin embargo queda como un trabajo pendiente para cumplir en un 100 % con el estándar definido para la compañía.

- Se requiere obtener una mayor garantía de las redes de comunicación, estandarizar con el personal de mantenimiento de la fábrica cuáles son los equipos que se pueden apagar los días de no producción y a su vez aumentar la fiabilidad de la red para que los instrumentos de medida estén siempre conectados.

- Finalmente, y como ya se había comentado anteriormente, se requiere obtener los valores de producción para cada uno de los subprocesos definidos, con el fin de garantizar la veracidad de los indicadores calculados.

Referencias

Bernard, J. T., y Côté, B. (2005). The measurement of the energy intensity of manufacturing industries: A principal components analysis. *Energy Policy*, *33*(2), 221–233. doi: 10.1016/S0301-4215(03)00220-9

Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brülhart, M. y Ernst, F. O. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management - Gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, *19*(6-7), 667–679. Descargado de `http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.011` doi: 10.1016/j.jclepro.2010.11.011

Chontanawat, J., Wiboonchutikula, P. y Buddhivanich, A. (2014). Decomposition analysis of the change of energy intensity of manufacturing industries in Thailand. *Energy*, *77*, 171–182. Descargado de `http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.111` doi: 10.1016/j.energy.2014.05.111

Coroiu, M., y Chindris, M. (2014). Energy efficiency indicators and methodology for evaluation of energy performance and retained savings. *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference*. doi: 10.1109/UPEC.2014.6934707

de Nooij, M., van der Kruk, R. y van Soest, D. P. (2003). International comparisons of domestic energy consumption. *Energy Economics*, *25*(4), 359–373. doi: 10.1016/S0140-9883(02)00100-7

E., M., S., L. y H., S. (2017). Energy : Report Corporate. (May), 1–48.

International Energie Agency. (2015). Indicadores de Eficiencia Energética: Bases Esenciales para el Establecimiento de Políticas. , 182.

Kott, M., y Kott, J. (2014). Indicators of energy intensity in industry. (Table I), 28–30.

Lindberg, C. F., Tan, S., Yan, J. y Starfelt, F. (2015). Key Performance Indicators Improve Industrial Performance. *Energy Procedia*, *75*, 1785–1790. Descargado de `http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.474` doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.474

Martínez, C. I. P. (2009). Energy efficiency developments in the manufacturing industries of Germany and Colombia, 1998-2005. *Energy for Sustainable Development*, *13*(3), 189–201. Descargado de `http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2009.07.001` doi: 10.1016/j.esd.2009.07.001

May, G., Barletta, I., Stahl, B. y Taisch, M. (2015). Energy management in production: A novel method to develop key performance indicators for improving energy efficiency. *Applied Energy*, *149*, 46–61. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.03.065

Patterson, M. G. (1996). What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy*, *24*(5), 377–390. doi: 10.1016/0301-4215(96)00017-1

Pitis, C., y Al-Chalabi, Z. (2016). Evaluation of energetic efficiency of the industrial systems by using benchmark energy factor. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, *2016-Octob*. doi: 10.1109/CCECE.2016.7726669

Reddy, B. S., y Ray, B. K. (2010). Decomposition of energy consumption and energy

intensity in Indian manufacturing industries. *Energy for Sustainable Development*, *14*(1), 35–47. Descargado de http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2009.12.001 doi: 10.1016/j.esd.2009.12.001

Schmidt, C., Li, W., Thiede, S., Kornfeld, B., Kara, S. y Herrmann, C. (2016). Implementing Key Performance Indicators for Energy Efficiency in Manufacturing. *Procedia CIRP*, *57*, 758–763. doi: 10.1016/j.procir.2016.11.131

Song, C., Li, M., Wen, Z., He, Y. L., Tao, W. Q., Li, Y., ... Huang, X. (2014). Research on energy efficiency evaluation based on indicators for industry sectors in China. *Applied Energy*, *134*, 550–562. Descargado de http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.049 doi: 10.1016/j.apenergy.2014.08.049

Stankovic, L., Stankovic, V., Liao, J. y Wilson, C. (2016). Measuring the energy intensity of domestic activities from smart meter data. *Applied Energy*, *183*, 1565–1580. Descargado de http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.087 doi: 10.1016/j.apenergy.2016.09.087

Tanaka, K. (2008). Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy. *Energy Policy*, *36*(8), 2877–2892. doi: 10.1016/j.enpol.2008.03.032

Xu, T., Karali, N. y Sathaye, J. (2014). Undertaking high impact strategies: The role of national efficiency measures in long-term energy and emission reduction in steel making. *Applied Energy*, *122*, 179–188. Descargado de http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.094 doi: 10.1016/j.apenergy.2014.01.094