

Eficiencia energética y ahorro de costes en instalaciones de túneles

Manuel Alberto Abella Suárez, I.T.

Minas, Comité de Túneles ATC;

Ignacio García – Arango Cienfuegos

– Jovellanos, ICCP, Jefe de la

Demarcación de Carreteras del Estado

*en Asturias; y **Fernando Hacar***

Rodríguez, ITOP, Ministerio

de Fomento.

Resumen

El suministro de energía es un elemento básico y fundamental para el funcionamiento de los sistemas instalados en los túneles carreteros, y el principal coste de explotación de los mismos.

En este artículo se hace un repaso a los principales sistemas instalados en los túneles que son consumidores demandantes de energía, y una aproximación a la factura eléctrica en donde se analizan los conceptos principales como primer paso para realizar una contratación conforme a las características de cada túnel.

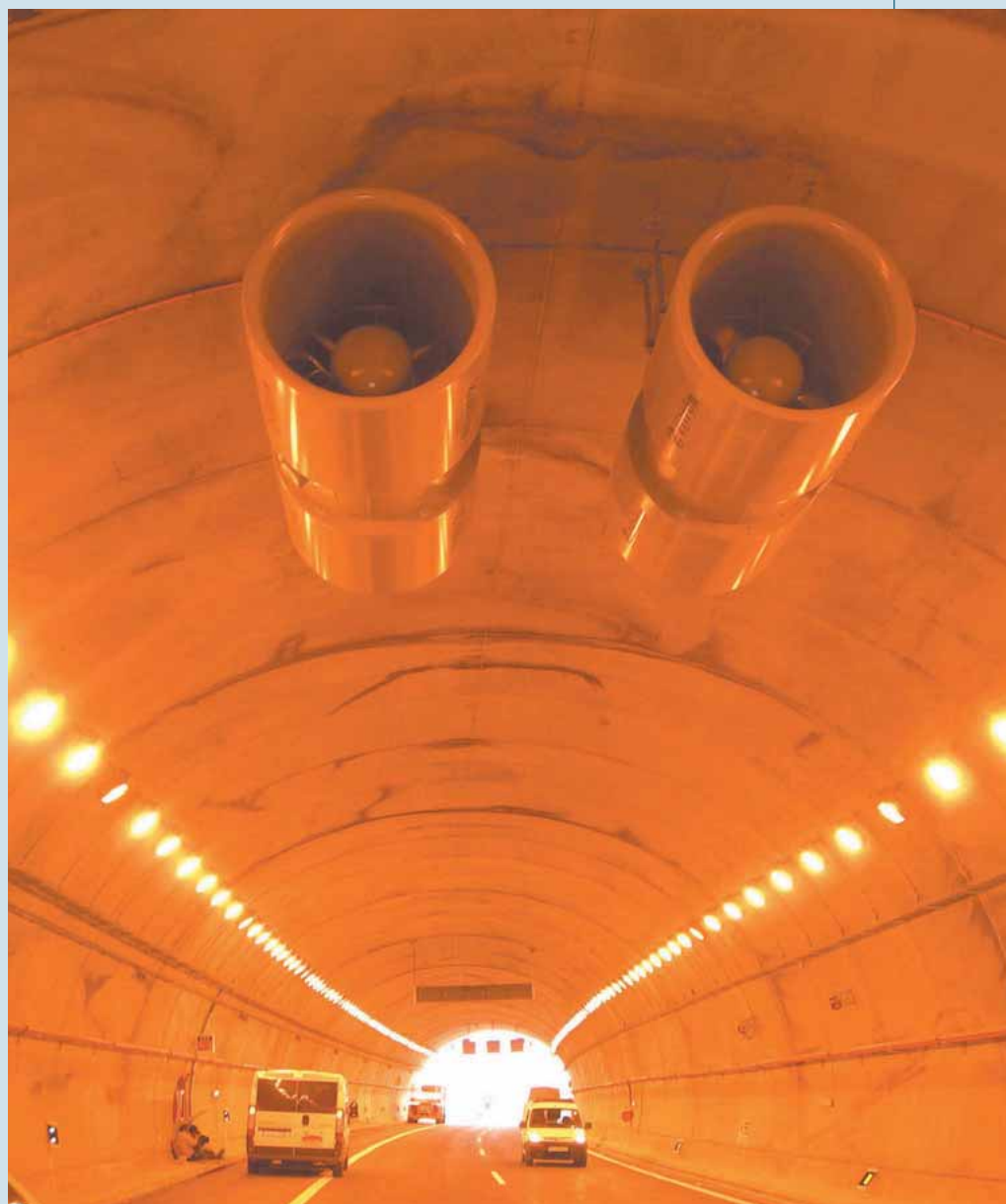
Palabras clave: eficiencia energética, luminarias, LED, kilovatio, término de potencia, término de energía, energía reactiva.

El funcionamiento de los sistemas instalados en los túneles no es posible sin el concurso de un suministro energético seguro y fiable. Esto se confía a las compañías eléctricas que garantizan la disponibilidad de corriente eléctrica, que conlleva un coste que varía en función de varios parámetros:

- El consumo, dado por el número de aparatos conectados en cada momento.

- La tarifa aplicable, o negociada.
- La potencia contratada.

La eficiencia energética en los túneles se consigue, no solamente conectando los aparatos imprescindibles en cada momento, sino también



a través de otros medios; entre ellos se pueden citar:

- La instalación de máquinas eficientes energéticamente.
- La disposición de sistemas que contrarresten las penalizaciones por energía reactiva.
- El uso adecuado de las instalaciones, unido a un buen mantenimiento preventivo y correctivo.
- La contratación de la potencia más favorable.
- La negociación de la mejor tarifi

fa posible.

A continuación se hará un análisis de cada una de ellos.

Maquinas Eficientes.

Los consumidores de energía en las instalaciones de cualquier túnel se desglosan a continuación:

- Alumbrado
- Ventilación
- Sistemas de señalización
- Sistemas de control
- Extinción de incendios
- Edificios

Alumbrado

El alumbrado es, sin duda el mayor consumidor de energía de un túnel. Es posible que otros sistemas (por ejemplo, la ventilación) tengan mayor potencia instalada, pero su utilización no es tan intensiva como el alumbrado. Desde su puesta en servicio siempre está iluminado el túnel, día y noche. Naturalmente su intensidad varía, y por tanto su consumo energético. El alumbrado dispone de circuitos de refuerzo para adecuar a las condiciones exteriores la luz que haya en los portales del túnel, facilitando la adaptación de los usuarios a la iluminación interior, eliminando el efecto de agujero negro, etc.

La densidad de luminarias a utilizar en el túnel podría ser objeto, en un primer pensamiento, de minoración, y así conseguir un ahorro. Las disposiciones normativas sobre la intensidad y distribución de la luz en la calzada hacen que exista, en realidad, muy poco margen; si se añade que se deben eliminar las consecuencias del efecto *flicker* o de alternancia, y otros considerandos, se ve que el ahorro no puede conseguirse por esta vía: se resume en los lúmenes/vatio que se pueden conseguir, y este camino solamente lleva a la elección entre diferentes tipos de lámpara: vapor de sodio de alta presión, incandescente, de mercurio, fluorescente, o de LED.

Las lámparas incandescentes tienen un rendimiento lumínico muy malo: la luz se produce al pasar la corriente por un hilo muy largo situado en una atmósfera inerte, que se calienta por ello hasta llegar a la incandescencia desprendiendo luz, por lo que la mayor parte de la energía se traduce en calor no en luz. **Sólo el 15% de la energía consumida se transforma en luz visible.**

En las luminarias basadas en lámparas de descarga, la luz emitida se consigue por excitación de un gas sometido a descargas eléctricas entre dos electrodos. Según el gas contenido en la lámpara (**vapor de sodio o mercurio**) y la presión a la que esté sometido (**alta o baja**) existen diferentes tipos de lámparas, ca-

Tipo de lámpara	Eficacia (sin balasto) l m/W	Vida media h
Lámparas de vapor de mercurio: Baja presión: Lámparas fluorescentes	38-91	12 500
Lámparas de vapor de mercurio: Alta presión: Lámparas de luz de mezcla	19-28	9 000
Lámparas de vapor de mercurio: Alta presión: Lámparas de vapor de mercurio a alta presión	40-63	25 000
Lámparas de vapor de mercurio: Alta presión: Lámparas con halogenuros metálicos	75-95	11 000
Lámparas de vapor de sodio: Lámparas de vapor de sodio a baja presión	100-183	23 000
Lámparas de vapor de sodio: Lámparas de vapor de sodio a alta presión	70-130	23 000

Eficacia de las lámparas de descarga (García Fernández, Javier; Boix, Oriol. 2009-2010)¹.



Lámpara incandescente inventada en 1879.

sario para iniciar la descarga y vencer así la resistencia inicial del gas a la corriente eléctrica. Tras el encendido, continúa un periodo transitorio durante el cuál el gas se estabiliza y que se caracteriza por un consumo de potencia superior al nominal.

■ **Balastos**, por el contrario, son dispositivos que limitan la corriente eléctrica que atraviesa la lámpara, evitando de ese modo un exceso de electrones circulando por el gas que aumentaría el valor de la corriente hasta llegar a ocasionar la destrucción de la lámpara.

Un mejor aprovechamiento, y por tanto un mayor ahorro, puede ir por la vía de dotar a los equipos de reductores de flujo que funcionen en las horas de menor intensidad de tráfico, o en las que se necesite una menor adaptación al entrar en túnel, es

Las luminarias basadas en diodos LED tienen un concepto de funcionamiento diferente a las de incandescencia o las de descarga: los LED utilizados en el alumbrado, llamados también led de potencia. Un led es un diodo, que cuando alcanza cierto umbral de tensión (< 5V) produce normalmente luz monocromática (es decir, de un color muy puro). Este color depende de la composición química del LED. Los led de potencia también se calientan, aunque su rendimiento es muy superior. Para un mismo valor de luminosidad sobre la calzada, una luminaria basada en Led tiene un consumo de aproximadamente el 50% de la lámpara de vapor de sodio de alta presión; además su duración es muy superior. Los fabricantes hablan de 100 000 horas, frente a las 12 000 de la lámpara de vapor de sodio de alta presión (**V.S.A.P.**), aunque este valor sea un tanto optimista, si se ha constatado una duración media en torno a las 60 000 horas. El mayor inconveniente es su coste inicial, superior a las convencionales de vapor de sodio de alta presión.

Se puede plantear un ahorro unido a un sistema novedoso, que sin duda, no tardará en implantarse en los túneles. Se trata de los sistemas de señalización de las salidas de

¹ Curso de Máster en Mecatrónica: Centro de Innovación Tecnológica en Convertidores Estáticos y Accionamientos. Universidad Politècnica de Catalunya. 2009-2010.

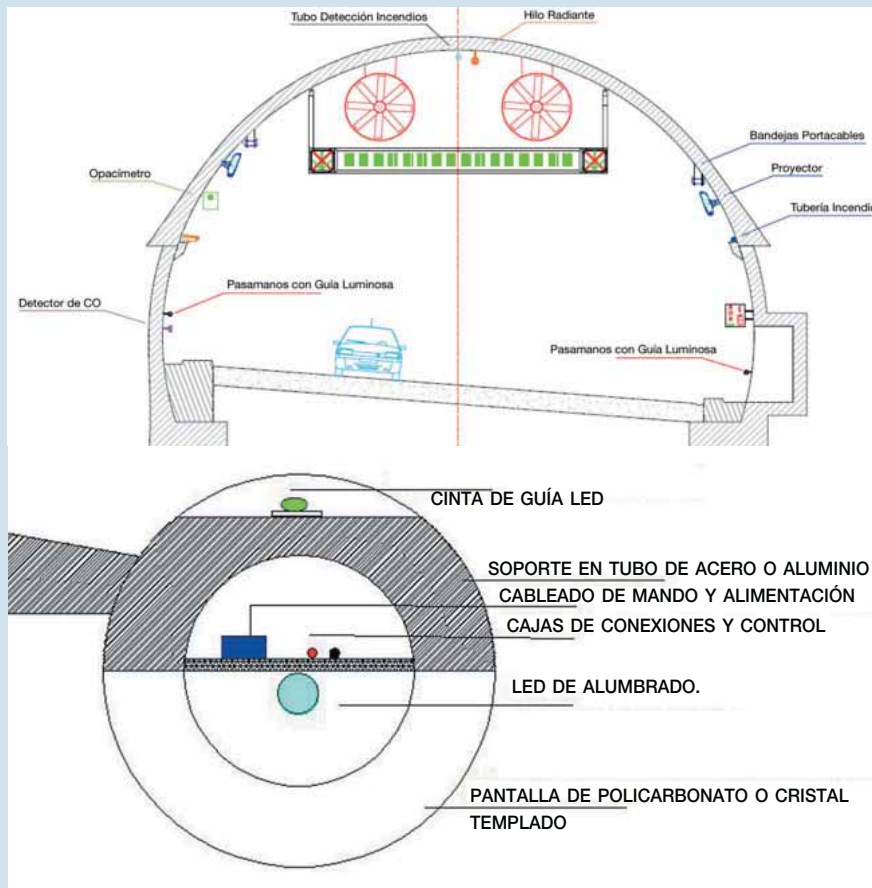


Figura 1. Arriba: Disposición de un sistema de guía luminosa. Abajo: Detalle del pasamanos con guía luminosa.

emergencia basados en tiras de LED con efecto dinámico, de forma que sean capaces de indicar hacia qué lado se debe efectuar la evacuación.

Estas tiras se suelen colocar adosadas al hastial del túnel. La propuesta es que estén colocadas en un pasamanos, que albergue en su parte inferior luminarias LED que sirvan de luminarias de emergencia y guía, como se muestra en la *figura 1*.

En la fase de proyecto es posible mejorar la eficacia energética del alumbrado con un diseño adecuado de los hastiales, de forma que su coeficiente de reflexión se vea mejorado.

Actualmente se están colocando en algunos túneles, sobre todo de cierta antigüedad, paneles de acero vitrificado que mejoran sensiblemente la reflexión de las paredes, a la par que permiten una limpieza mucho mejor, más rápida y eficaz, manteniendo de este modo las condiciones de luminosidad en niveles óptimos.

Si se hace en la fase de pro-

yecto, el alumbrado se calcula con estos condicionantes, por lo que el resultado son muchas menos luminarias, y, por tanto, menor potencia instalada.

Cuando se hace con un determinado sistema de alumbrado ya instalado, su eficacia real –a efectos de eficiencia energética– es mucho menor, y más discutible: efectivamente sí se apreciará más claro el túnel, pero seguirá con el mismo consumo al estar funcionando los mismos circuitos. Eliminar circuitos o luminarias conlleva otros problemas, como son los derivados del efecto *flicker* o de alternancia, la distribución fotométrica, la luminancia media, etc., que deben cumplir las disposiciones normativas, por lo que no es recomendable experimentar con ello.

Ventilación.

La eficacia de las máquinas utilizadas en la ventilación viene dada por tres aspectos inherentes al ventilador:

- El motor

- La parte aerodinámica: los álabes y **silenciadores**.

- La colocación en el túnel.

El rendimiento de los motores se ha mejorado mucho en los últimos años. Generalmente los ventiladores emplean motores en jaula de ardilla, con arranque directo, si es posible, o con arrancadores suaves o variadores de frecuencia, si su potencia es elevada.

Con la utilización de variadores de frecuencia, es posible el control de la velocidad, y por tanto del consumo del ventilador.

Se puede pensar que la mejor forma de ahorro es utilizar los ventiladores a la velocidad que sea necesaria –controlada por el variador de frecuencia– en cada momento.

Este razonamiento sencillo tiene el inconveniente del conocimiento real y efectivo de las condiciones necesarias de funcionamiento, y de la complejidad de su control. Esta complejidad lleva, de hecho, a que el ansiado ahorro se convierta en un mayor gasto al introducir algoritmos y parámetros en la aplicación tendientes a ir del lado de la seguridad. La simplicidad de arrancar, en modo automático, los ventiladores necesarios para conseguir un caudal de aire que diluya los contaminantes, parándolos cuando lleguen a valores admisibles es sin duda un sistema mucho más sencillo, y eficaz.

La auténtica eficacia del ventilador está en su diseño, especialmente en la geometría de sus álabes, sean éstos los fijos o los móviles situados en el rodete solidario con el motor; este diseño es el que realmente condiciona el ahorro que se puede conseguir en estas máquinas. La elección, en la fase de construcción y equipamiento de un túnel, de un ventilador de menor eficacia por su precio, condiciona y penaliza el consumo de energía durante toda la vida del túnel, a la par que hace necesario un mayor número de aparatos.

Un aspecto muy a tener en cuenta en el rendimiento de los ventiladores es su ubicación en el túnel.

Es bien cierto que en muchas ocasiones los ventiladores se colocan “donde se puede”; la geometría del



Distribución de demanda de potencia instalada en un túnel unidireccional.

túnel, su sección transversal y, especialmente, no contemplar de manera global el diseño del túnel en la fase de diseño y proyecto, obligan a colocar los ventiladores en lugares a veces inverosímiles, que merman su rendimiento de forma dramática, teniendo, en muchos casos, que recurrir a artificios aerodinámicos para **tratar de** mejorar mínimamente su rendimiento.

En la fase del cálculo de la ventilación existe una tendencia, reñida con el sentido de la ingeniería, de adoptar parámetros del lado más conservador posible, **“saltando” de una norma a otra con criterios de maximizar**; algunos de ellos, que influyen muy notablemente en el número y potencia de las máquinas a colocar son:

- Altos coeficientes de fricción de las paredes. Se adoptan coeficientes de fricción de 0,03 o superiores en superficies de hormigón, cuando 0,02 ya es un valor conservador. En todo caso, aparte de la bibliografía existente, son coeficientes calculables y medibles si llega el caso.

- Límites de concentraciones admisibles: Existe una tendencia a colocar el límite de concentración de CO en 20 p.p.m., cuando para un tráfico fluido se recomiendan valores mucho más elevados.

- Pérdidas en entradas y salidas del túnel.

- Aumento del número de ventiladores, entre dos y tres unidades, como seguridad ante un incendio.

Un cálculo correcto obliga a considerar los parámetros en su conjun-

to, sin caer en la multiplicación de los coeficientes, y siendo menos laxos en los criterios, “para ir del lado de la seguridad”, conlleva un diseño mucho más eficiente, tanto desde el plano energético como funcional, y por ello menos seguro.

Por su parte, la ventilación es un sistema que necesita grandes recursos de potencia para trabajar en su totalidad, pero por el contrario se utiliza en pocas ocasiones: es decir, la ventilación en modo de funcionamiento normal de un túnel, la produce el propio tráfico, especialmente en los túneles unidireccionales. En caso de congestión, es necesario utilizar los ventiladores instalados, pero no es frecuente que sean necesarios todos a la vez. Los casos de emergencia grave, como es el caso de incendio, sí necesitan del concurso de toda la potencia de ventilación instalada, y por ello los centros de transformación se deben diseñar con capacidad suficiente para cubrir toda la demanda de potencia de todos los sistemas trabajando de manera simultánea.

Como ejemplo de la demanda de la ventilación, se muestran dos casos de túneles unidireccionales, con una intensidad de tráfico distinta, y de diferentes características en cuanto a su geometría y pendientes; en ambos no se han registrado incidentes graves que obliguen a disponer de todos los ventiladores funcionando (aunque, obviamente, están dispuestos para trabajar en esos casos de emergencia), salvo las

pruebas obligadas para comprobarlos, que se realizan en ambos con una periodicidad similar.

Ambos tienen un centro de transformación en cada vertiente, que alimenta dos mitades de cada tubo, por lo que a efectos prácticos es como si cada centro de transformación alimentase a un tubo completo. Las potencias respectivas se muestran en la figura superior, separadas por los tramos de entrada y salida de cada túnel, la suma de ambos es la carga del C.T. de cada lado del túnel:

Como se aprecia en la figura, el 88% de la potencia instalada se necesita para dar cobertura a la ventilación, y el 22% restante al alumbrado y servicios (señalización bombas contra incendios, etc.). Ello no se traduce, sin embargo en la correspondencia con los consumos, que se pueden apreciar en los gráficos de la página siguiente.

Se puede ver que los consumos anuales indican la poca influencia de la ventilación, que, sin embargo es un sistema absolutamente imprescindible por razones de seguridad. No obstante, sí es posible actuar para conseguir un ahorro importante en la factura de energía. ¿De qué forma se puede conseguir?

El precio que las compañías cobran a sus “abonados”, consta de tres términos principales:

1. El término de Potencia Contratada.
2. Los Kilovatios consumidos: Término de Energía
3. La energía reactiva.

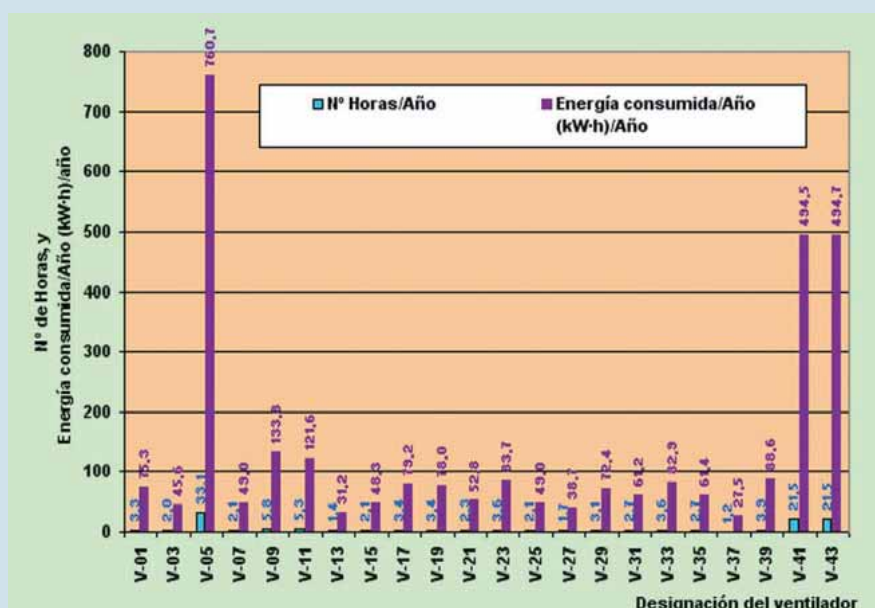
A continuación se realiza un desglose de la factura eléctrica:

1.- Potencia Contratada: (facturación por potencia) kW.

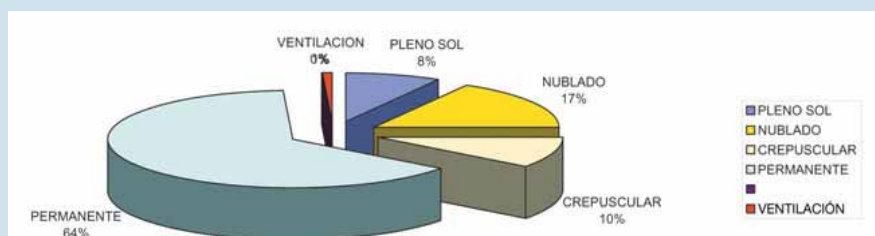
Potencia facturada x Importe unitario de potencia x Nº de meses

Depende de la potencia que se haya pactado que deba estar disponible.

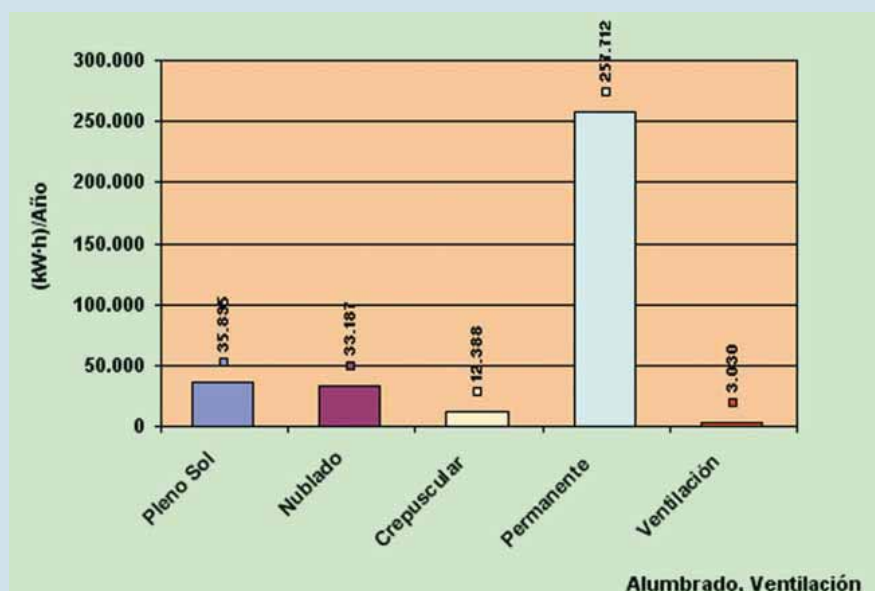
Generalmente, se suele contratar la potencia máxima de los Centros de Transformación, que se instalan en la fase de construcción, y que no es la potencia que realmente se utiliza; aun en un supuesto de que todos los circuitos instalados funcionen



Horas y potencia consumida por los ventiladores en el año.



Comparación anual de funcionamiento de los distintos circuitos de alumbrado y de ventilación.



Consumos anuales en kW del alumbrado y la ventilación.

simultáneamente, se trataría de una situación excepcional, y en todo caso de poca duración.

2.- Termino de energía: (facturación por consumo) kWh, medidos en el contador; en el se incluye:

- Coste de la energía.

- Retribución a la red de transporte y distribución. (Actividad regulada)
- Margen a la comercializadora.
- Impuestos. Tasa municipales

3.- Energía reactiva: recargo en la factura eléctrica en función de su consumo o generación de energía reactiva,

asociado a las instalaciones del cliente.

La *energía reactiva* es la demanda extra de energía que algunos equipos de carácter inductivo como motores, transformadores, luminarias, necesitan para su funcionamiento. Rara vez es necesario abonar este concepto, debido fundamentalmente a la instalación de baterías de condensadores que palían el consumo de energía reactiva por los motores de los ventiladores. Otras fuentes generadoras de energía reactiva, como son las luminarias de vapor de sodio de alta presión, ya la compensan individualmente en cada luminaria.

Además existen otros elementos en la factura que deben considerarse por su gran repercusión, son estos:

* **Complemento exceso de potencia:** coste que se paga por una demanda superior a la potencia contratada. Si, como generalmente ocurre, se contrata por el total de la potencia instalada, no se abona nada en este concepto, aunque es una variable que se debe tener en cuenta en aras de mejorar el coste de la factura.

* **Impuesto eléctrico:** calculado como la base imponible por $1,05113 \times 4,864$.

Para el cálculo de la base imponible no se tiene en cuenta el alquiler de los equipos.

Una optimización del consumo pasa por adecuarlo a las mejores condiciones de facturación.

La potencia a facturar se ajusta a los siguientes parámetros, en función del consumo:

- **Menos del 85%:** Se factura el 85% de la potencia contratada.
- **Entre el 85%–105%** de la potencia contratada: Se factura la lectura del waxímetro.
- **Más del 105%:** Se factura la potencia contratada más una penalización.

De cara a minimizar el coste de la potencia facturada, la potencia demandada por la instalación en condiciones normales debe tener un valor situado en un rango entre el 85% y el 105% de la potencia contratada. Determinar cuáles son esas con-

TARIFA DE ACCESO 3.1A

Península y Canarias

Verano

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Laborables	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2
Sáb, Dom y Fest	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P2	P2	P2	P2	P2	P2

Invierno

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Laborables	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2
Sáb, Dom y Fest	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2

Invierno

Verano



Distribución horaria.

La primera, se producirá en muy contadas ocasiones, generalmente fruto de accidentes.

La segunda si es una situación aún más excepcional, afortunadamente, y la penalización tarifaria se puede decir que está, por un lado bien pagada, y por otro lado suficientemente amortizada.

Conclusión

El colofón de este artículo es:

Las instalaciones que deban renovarse, o sean de nuevo diseño, deben considerar la implantación de luminarias del tipo LED: el ahorro a medio plazo en la factura eléctrica compensa claramente la mayor inversión inicial, además de un ahorro en las secciones de los cables y otros elementos (SAI, Transformadores, Grupos electrógenos, etc.).

La ventilación debe estudiarse con criterios y datos realistas, y colocar los aparatos en las mejores disposiciones aerodinámicas. Las secciones de los túneles deben diseñarse para ello, y, si físicamente no es posible, contemplar los distintos sistemas de ventilación para elegir el más adecuado.

La contratación de la energía debe seguir unos criterios realistas, se debe realizar un estudio serio de la situación y singularidad de cada túnel, para conseguir el menor coste energético en los conceptos de potencia contratada. ■

diciones normales debe ser objeto de un análisis detenido, considerando la peculiaridad de cada túnel.

Si en el ejemplo considerado se ha contratado la misma potencia que la instalada, se está pagando por el término de potencia una cantidad que, aun con el descuento por la no utilización (*Menos del 85%: Se factura el 85% de la potencia contratada*) encarecerá la factura sin necesidad.

Debe considerarse también que las tarifas de discriminación horaria no favorecen mucho el ahorro en el caso de los túneles: Una tarifa de este tipo establece como horas punta y llano (las más onerosas) las comprendidas entre las 11 y las 15 en verano, horas en las que funciona más el alumbrado soleado, y por ello de mayor consumo.

En invierno las horas punta se sitúan entre las 18 y las 22 horas, que es favorable al ser aquéllas en las que prima el alumbrado nocturno. En todo caso las horas llano son en las que la necesidad de energía se mantiene alta: en invierno entre las 8 y las 18 horas, y en verano entre las 8 y las 11 y entre las 15 y las 00 horas.

En el ejemplo propuesto, que es válido para la mayoría de los túneles no urbanos sin grandes pendientes, la utilización de la ventilación –que supone el 88% de la potencia instalada– representa un consumo del 1% anual. Quiere ello decir, que, si la potencia contratada fuese la necesaria para atender a las necesidades del alumbrado y los servicios, se estaría ahorrando una cantidad importante en el concepto de potencia contratada.

Una forma racional y segura de ahorro en la factura energética sería, por tanto, establecer como potencia contratada una cantidad entorno al 25% superior a la potencia necesaria para atender el alumbrado completo y los servicios, y dotar de un taxímetro a la instalación: de este modo el exceso será facturado con la correspondiente penalización, pero se asegura la potencia máxima de la instalación al no existir ningún limitador.

Este posible exceso se podrá producir, en los túneles de las características antedichas, en muy contadas ocasiones: Congestión, o incendio.