

Estudio Psicrométrico y Análisis Técnico de Aplicación de Aire Acondicionado en Mina Cobriza

Daniel I. Naupari Escobar

DOE RUN PERU – Cobriza Division

dnaupari@pe.doerun.com

RESUMEN

Mina Cobriza se caracteriza por la explotación masiva de minerales de cobre con un ritmo de explotación de 8,000TN/día, mediante los métodos de Taladros Largos y Corte y Relleno Ascendente, ambos altamente mecanizados, las dimensiones de la mina son de 7km de ancho por 1.2km a más de encampane en algunos puntos.

Debido a las condiciones termo-ambientales en la superficie, ceja de selva, como las fuentes de calor en el interior de la mina, gradiente geotérmico y equipos de gran dimensión principalmente, las condiciones termo-ambientales en el interior de la mina se caracterizan por ser cálidas razón por la cual la efectividad del sistema de ventilación debe ser asegurada para lograr las mejores condiciones termo-ambientales que permitan que el desarrollo de las operaciones unitarias de minado se desarrollen con la seguridad y productividad características de una explotación subterránea a gran escala.

Con la ayuda de la psicrometría se evaluó la efectividad del sistema de ventilación de la profundización de Mina Cobriza encontrándose que el sistema no era adecuado para llevar a cabo una profundización segura y rentable debido a que las condiciones termo-ambientales se encontraban fuera de los límites máximos permisibles de exposición a la alta temperatura, temperatura seca, 37°C, temperatura húmeda, 31°C, índice de exposición a la alta temperatura, 32.8°C, en la labor más profunda. Así mismo se identificó que la cantidad de aire del sistema era insuficiente por lo que fue necesario modificar el sistema de ventilación.

Finalmente se hará uso de la psicrometría para evaluar la efectividad de los cambios realizados al circuito de ventilación concluyéndose que las condiciones termo-ambientales han sufrido una efectiva mejora en la zona de trabajos pero que aún es necesario mejorar las condiciones en los frentes de profundización para lo cual con ayuda de los diagramas psicrométricos se evaluará de manera general la posibilidad de aplicación de sistemas de acondicionamiento del aire.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de operaciones unitarias de minado en ambientes de alta temperatura en minas subterráneas es cada vez una práctica más frecuente debido a la profundización de los cuerpos mineralizados así como la utilización de equipos de gran dimensión, es por ello que los

responsables del Área de Ventilación deben contar con las herramientas adecuadas para el estudio y análisis de las condiciones termo-ambientales así como para la comprensión del comportamiento del flujo de aire desde el punto de vista termodinámico. Es por lo anteriormente expuesto que el uso de la Psicrometría, estudio del aire húmedo, debe ser una herramienta de primera mano para la comprensión de sistemas de ventilación con alta temperatura que permita evaluar la efectividad del sistema de ventilación actual y considerar los efectos de las fuentes de calor para así modificar en conveniencia, de las personas y equipos afectados, las condiciones termo-ambientales al interior de la mina.

En el presente trabajo técnico se dará a conocer las técnicas de campo empleadas para realizar un estudio base desde el punto de vista Psicrométrico así como la evaluación del comportamiento termodinámico del sistema y las acciones llevadas a cabo para la mejora del mismo con la correspondiente evaluación psicrométrica final. Finalmente se realizará una breve introducción del análisis para la aplicación de sistemas de acondicionamiento de aire masivos.

PALABRAS CLAVE

Ventilación, mina, termodinámica, psicrometría, aire, humedad, alta, temperatura.

PROCEDIMIENTO DE CAMPO

Instrumentos Empleados

Para la realización del levantamiento de los parámetros característicos del flujo de aire en interior mina se hizo uso de los siguientes instrumentos previamente calibrados:

1. Levantamiento de Caudales
 - a. 01 Anemómetro Mecánico (Marca: Davis)
 - b. 01 Cronómetro
 - c. 01 Distanciómetro Laser (Marca: Leica Modelo: Disto D8)
2. Levantamiento de Temperaturas Seca y Húmeda y Presión Barométrica
 - a. 01 Termo-anemómetro (Marca: Kestrel Modelo: 4200)

Métodos de Monitoreo

1. Monitoreo de Caudales

Para el monitoreo de caudales se hizo uso del método del barrido con la ayuda del anemómetro mecánico el cual brinda una medida promedio de la velocidad del aire gracias a que acumula una distancia en un determinado tiempo, medido en el momento con el cronómetro. Las dimensiones de la sección de las galerías fueron medidas con ayuda de un distanciómetro laser.

Para evitar la variabilidad de los resultados se realizaron tres mediciones de la velocidad del aire verificando que la diferencia entre las mismas no supere el 10% del

promedio, caso contrario se procedió a realizar una cuarta medición para eliminar la medición de mayor variación.

2. Monitoreo de Temperaturas y Presión Barométrica

Para el monitoreo de las temperaturas seca y húmeda así como la presión barométrica se hizo uso del termo-anemómetro el cual presenta las correspondientes sondas de temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo.

Para obtener mediciones exactas de las temperaturas características del aire se permitió que los sensores equilibren su temperatura con la del ambiente para ello se les posicionó en la estación de monitoreo durante al menos un minuto verificando que los valores de temperatura y presión barométrica permanezcan estáticos.

3. Estaciones de Monitoreo

Se establecieron estaciones de monitoreo en nodos característicos del sistema de ventilación así como antes y después de fuentes de calor conocidas, principalmente aguas termales. La principal característica de las estaciones de monitoreo es la de capturar las temperaturas secas y húmedas así como la presión barométrica durante el recorrido del aire en el sistema de ventilación.

Para determinar el caudal se consideraron estaciones puntuales principalmente en ingresos y salidas de aire así como en bifurcaciones principales.

En total se establecieron un total de 15 estaciones de monitoreo para el estudio inicial del Circuito de Ventilación de la Profundización de Mina Cobriza.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Información Recopilada

El comportamiento del aire desde el punto de vista psicrométrico es presentado mediante un diagrama psicrométrico el cual permite relacionar las temperaturas características del aire con las características del contenido de humedad del mismo.

En resumen las características psicrométricas del circuito de ventilación inicial son:

- Temperatura de Bulbo Seco Máxima	39.4 °C
- Temperatura de Bulbo Seco Promedio	28.8 °C
- Temperatura de Bulbo Húmedo Máxima	33.5 °C
- Temperatura de Bulbo Húmedo Promedio	26.0 °C
- Presión Barométrica Promedio	79414.74 Pa

Así mismo podemos ver el diagrama psicrométrico a continuación:

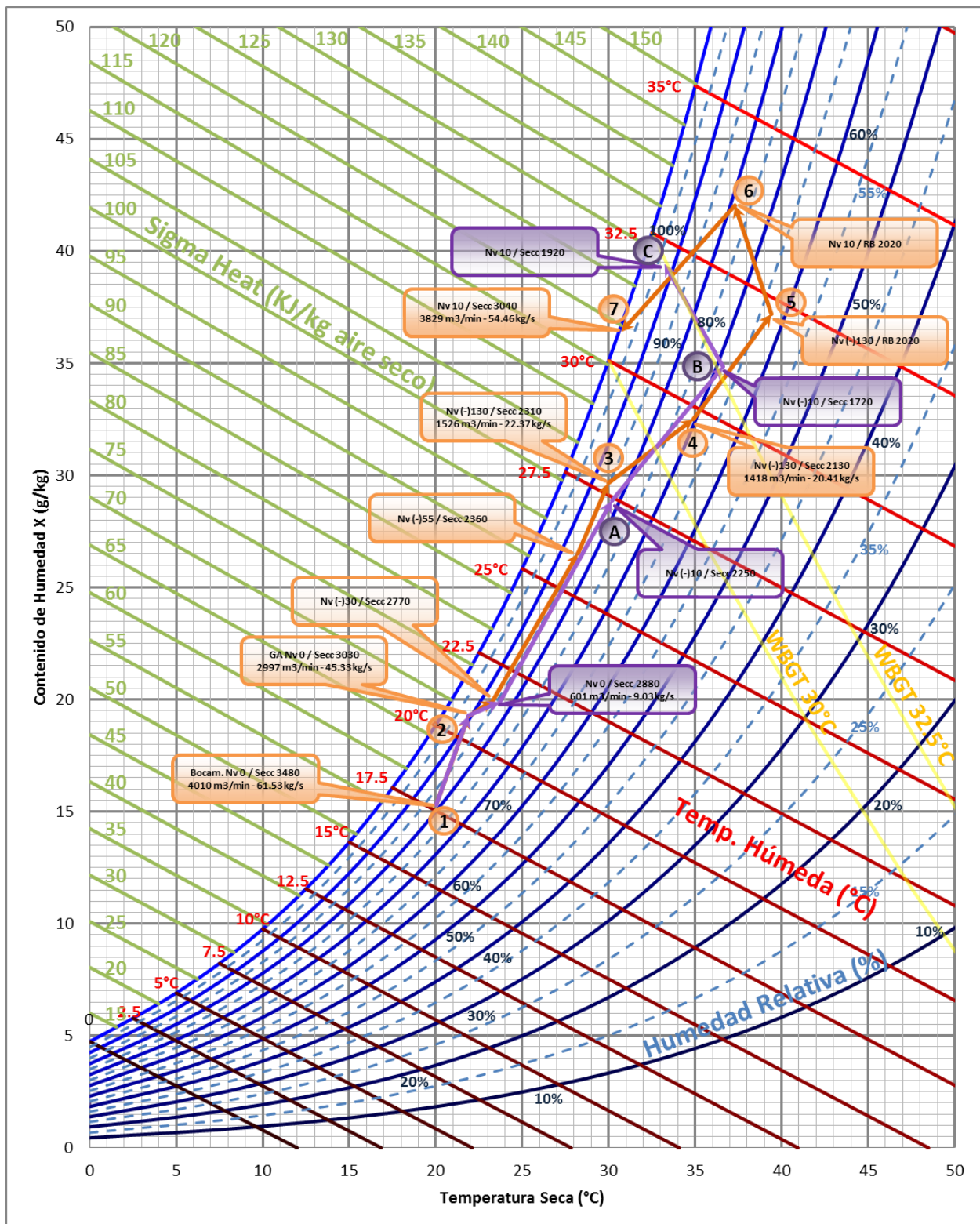


Ilustración 1: Diagrama Psicrométrico de Circuito de Ventilación Inicial a 79414.74 Pa.

Análisis Térmico del Circuito de Ventilación Inicial de la Profundización

El circuito de mayor importancia para el presente estudio es el que se encuentra identificado con color naranja en la Ilustración 1: Diagrama Psicrométrico de Circuito de Ventilación Inicial a 79414.74 Pa. esto debido a que corresponde al circuito de la profundización donde actualmente se encuentran centradas las operaciones de perforación y voladura para el desarrollo de nuevos bloques de explotación de la mina.

Como se puede observar entre los puntos 1 y 2, ingreso de aire fresco a partir de la Bocamina Nv 0, el incremento de temperatura y humedad se da debido a que en dicha labor se encuentran ubicadas las pozas de colección y tratamiento de agua de toda la mina, las cuales debido a la presencia de aguas termales presenta una temperatura media a alta.

Entre los puntos 2 y 3 el aire inicia su descenso hacia las labores de profundización observándose un incremento en el contenido específico de humedad, dicho aporte de humedad se da principalmente debido a la presencia de equipos diesel, combustión de petróleo que genera vapor en el tubo de escape, ya que la misma ruta es usada por los equipos de acarreo de mineral hacia el pique de extracción a superficie, otra fuente de calor identificada es la generada por el gradiente geotérmico el cual se encuentra en promedio a una temperatura de 40°C, debido al encampane así como a la reacción exotérmica de los minerales constituyentes, gran parte pirrotita.



Ilustración 2: Equipos de Carguío y Acarreo de Mineral de Gran Dimensión. Dux 30 TN (Izquierda) y Scoop R2900 (Derecha).

Entre los puntos 3 y 4 se encuentra uno de los frentes de profundización, como se puede observar, la toma de aire, ubicada cerca al punto 3, se encuentra por debajo de la Temperatura de Globo de Bulbo Húmedo, WBGT, de 30°C, límite a partir de cual es necesario aplicar controles adicionales para el trabajo en alta temperatura, y cuando el aire sale de dicha labor el aire continua su trayecto hacia el punto 5.

Entre los puntos 4 y 5 se encuentra el último frente de desarrollo de la profundización el cual como se puede observar cuenta con una WBGT superior a los 32.5°C por lo que se encuentra fuera de los límites máximos permisibles de exposición a la alta temperatura.

Finalmente ambos circuitos, naranja y morado, se reúnen nuevamente en el nivel 10, mezcla entre los puntos 6 y C, y el aire sale hacia el extractor principal, punto 7.

Como se puede observar los puntos 6 y C presentan una alta humedad, con presencia de condensación debido a la pérdida de presión durante su ascenso a través de la RB 2020, desde el Nv (-) 130 hasta el Nv 10, aproximadamente 140m de diferencia de cotas, por lo cual la presencia de condensación de agua es sumamente notoria con humedecimiento de las paredes y una reducida visibilidad.

Análisis de Caudales del Circuito de Ventilación Inicial de la Profundización

Como se puede observar en la Ilustración 1: Diagrama Psicrométrico de Circuito de Ventilación Inicial a 79414.74 Pa., se cuenta con un ingreso total de aire de 2997 m³/min (105,838 CFM), sin embargo el caudal efectivo en la profundización, circuito naranja, es de 1526 m³/min (53,890 CFM) representado así el 50.92%, esto se debe a que se cuenta con un ventilador extractor de capacidad nominal de 50,000CFM en la cabeza de la RB 2020 y el resto del flujo es generador por el extractor principal del Nv 10, de capacidad nominal 300,000CFM, pero que se encuentra conectado a dos zonas.

ANALISIS DE LA ALTERNATIVA DE MEJORA

Incremento de la Cantidad de Aire

Según el análisis de cobertura del circuito de la profundización la cobertura inicial es de tan solo el 51% por lo que el incremento del caudal de aire no solo es una alternativa factible sino necesaria para cumplir con los requerimientos de ley.

Por otro lado la velocidad del aire en una sección típica, 6m de ancho por 5m de alto, es de tan solo 0.87 m/s lo cual genera que el tiempo de contacto entre el aire y las diversas fuentes de calor, roca, equipos, aguas termales, etc., sea el suficiente para lograr una transferencia de calor efectiva.

Las chimeneas RB en mina Cobriza se caracterizan por ser de un diámetro de 3m, considerando un caudal de 100,000 CFM la velocidad del aire sería de 6.7m/s considerando además que las chimeneas son elaboradas en las cajas, conformadas principalmente por pizarras libres de reacciones exotérmicas, y que el aire se trasladaría sin contacto con algún tipo de equipo, las chimeneas RB se presentan como un alternativa factible de transporte de aire fresco hasta las zonas de trabajo en interior mina.

Modificación Global del Circuito de Ventilación de la Profundización

Como se mencionó anteriormente es necesario incrementar el volumen de aire de la profundización sin embargo esto no solo implica la implementación de ventiladores secundarios para forzar el ingreso o extracción de más aire de la zona ya que el extractor principal del Nv 10 se encuentra acoplado a otra zona de la mina, realizar una acción de este tipo solo resultaría en un desbalance del circuito de ventilación de la zona asociada a la profundización.

Por lo anteriormente expuesto es necesario incrementar el volumen total de aire extraído del circuito de ventilación para lo cual se deberá incrementar un extractor principal en alguna conexión hacia la superficie. La única comunicación asociada al circuito en cuestión que se encuentra disponible para la instalación del extractor requerido es la Bocamina del Nv 0, ingreso inicial de aire fresco.

La Bocamina del Nv 0 cuenta con las características adecuadas para la extracción de aire las cuales son:

- Instalaciones eléctricas (4160 V) y obras civiles adecuadas para la instalación de un ventilador principal (anteriormente se contaba con un ventilador inyector).
- Poca o nula elaboración de trabajos y presencia de personal en la ruta de evacuación del aire hacia la bocamina.
- Ausencia de instalaciones eléctricas u de otro tipo que pueden verse afectadas por la presencia de aire caliente y húmedo.
- Ausencia de viviendas, comedores u oficinas o instalaciones similares en la superficie que pudiesen verse afectadas por la presencia del ventilador.

Por otro lado la alternativa de elaboración de una nueva bocamina adicional se considera como una alternativa de largo plazo debido a las condiciones estructurales del terreno en la superficie, a la distancia desde la superficie hasta las labores de interior mina y a la logística necesaria para el funcionamiento de un extractor de tal envergadura.



Ilustración 3: Condición Inicial de Base para Extractor en Bocamina Nv 0.

MODIFICACIÓN DEL CIRCUITO DE VENTILACIÓN DE LA PROFUNDIZACIÓN

Instalación del Extractor Principal Adicional

Según las condiciones expuestas se tomó la decisión de realizar la instalación de un extractor adicional en la bocamina del Nv 0 para lo cual se llevó a cabo las obras civiles complementarias para la instalación del ventilador ya que la configuración anteriormente empleada fue de inyector siendo necesaria la elaboración de una base adicional para la instalación del ventilador como extractor.



Ilustración 4: Traslado e Instalación de Ventilador en Bocamina Nv 0.

Instalación de Ventiladores Secundarios

De manera complementaria se consideró la necesidad de instalar ventiladores secundarios en las chimeneas RB en las secciones 2020 y 1640 ambos como inyectores hasta las zonas más profundas de la mina considerándose así los beneficios del transporte del aire fresco a través de las chimeneas RB sin que fuentes adicionales de calor, a parte de la roca, tengan contacto con el mismo.



Ilustración 5: Ventiladores Secundarios, RB 1640 (Izquierda) y RB 2020 (Derecha). Ambos Inyectores de Aire Fresco.

CONDICIONES FINALES DEL CIRCUITO DE VENTILACIÓN DE LA PROFUNDIZACION

Una vez realizados los cambios indicados anteriormente, aproximadamente 2 meses de trabajo, y haber esperado a que las condiciones termo-ambientales se estabilizaran se procedió a realizar un nuevo levantamiento del circuito de ventilación el cual se encontraba con las siguientes condiciones:

- El nivel (-) 10 ya no contaba con operaciones y todos los equipos de acarreo se han trasladado al Nv (-) 130.
- Se ha desarrollado la RB 1640 entre los niveles 0 y (-) 130 dando continuidad al tramo ya existente entre los niveles 10 y 0.
- El ingreso de aire fresco es ahora desde el Nv 28 – Norte bajando por el z/z A3 hasta el Nv 10 e ingresando en dirección hacia el norte, ruta anterior de evacuación de aire viciado.
- Se instalaron dos extractores en paralelo de 50,000 CFM en la RB 2020 para mejorar las condiciones termo-ambientales y una vez instalado el extractor del Nv 0 se procedieron a invertir para cumplir una función de inyección de aire fresco.

Finalmente los resultados obtenidos desde el punto de vista psicrométrico y de caudales fueron:

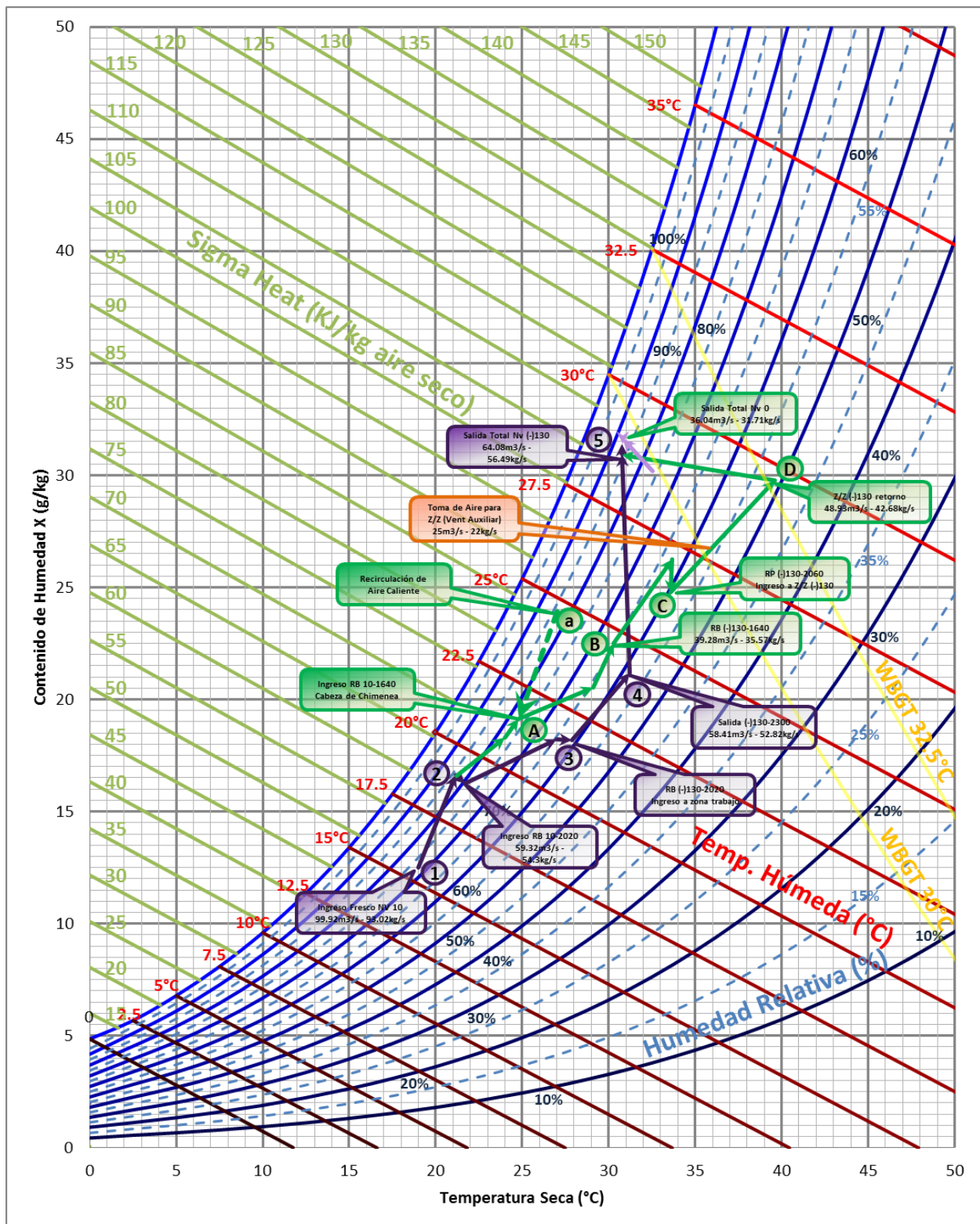


Ilustración 6: Diagrama Psicrométrico de Circuito de Ventilación Final a 80780.00 Pa

Análisis Térmico del Circuito de Ventilación Final de la Profundización

Como se puede observar en la Ilustración 6: Diagrama Psicrométrico de Circuito de Ventilación Final a 80780.00 Pa se pueden identificar 02 rutas de ingreso de aire fresco, una con color morado y la otra con color verde, ambas corresponden al ingreso de aire fresco hacia el Nv (-) 130 ya que el circuito del Nv (-) 10 ya no es de interés debido a que las operaciones en dicho nivel han finalizado.

El punto 1 corresponde al ingreso del aire ya en el Nv 10, después de que el aire ha ingresado por la Bocamina 28-Norte y haber descendido por el z/z A3. En el punto 2 el aire sufre la primera bifurcación al ingresar una parte hacia la RB 2020, debido a la presencia de dos ventilador inyectores. En este punto ya se puede apreciar una notable diferencia frente al circuito inicial ya que el aire tiene una temperatura de bulbo seco (ts) de 21°C y una temperatura de bulbo húmedo (th) de 18°C mientras que anteriormente en el ingreso los valores de ts y th eran de 23.5°C y 21°C respectivamente. En el punto 3, el aire ya ha sido inyectado hacia el Nv (-) 130 en este punto los valores de ts/th son 28°C/21.5°C mientras que en el circuito inicial los valores de ts/th son 35°C/29.5°C respectivamente con lo que las condiciones termo-ambientales son notablemente diferentes.

Por otro lado, entre los puntos 2 y A ocurre un mayor incremento de la temperatura del aire ya que la velocidad es mucho menor debido a que una parte ya ha sido derivada por la RB 2020, así mismo en el punto A se evidenció una recirculación de aire caliente, denotada con la letra a, que ocasiona un ligero incremento en la temperatura del aire, en este punto las temperaturas ts/th son 25°C/21°C mientras que anteriormente las temperaturas ts/th en el ingreso era de 23.5°C/21°C respectivamente. Sin embargo al llegar al Nv (-) 130 las temperaturas ts/th son de 30°C/24.5°C mientras en el circuito inicial eran de 35°C/29.5°C aportando notablemente a la mejora de las condiciones termo-ambientales.

ANÁLISIS TÉCNICO DE APLICACIÓN DE AIRE ACONDICIONADO

Como podemos observar en la Ilustración 6: Diagrama Psicrométrico de Circuito de Ventilación Final a 80780.00 Pa entre los puntos C y D se alcanza la Temperatura de Globo de Bulbo Húmedo (WBGT) de 30°C y en la salida se supera los 32.5°C, límite máximo de exposición a la alta temperatura. Por lo que si se deseara continuar desarrollando más labores de preparación y desarrollo será necesaria la aplicación de algún método que permita disminuir la temperatura del aire para mejorar las condiciones termo-ambientales.

Uno de los métodos más comúnmente aplicados es el uso de aspersores de agua fría en la corriente de aire, también conocido como “cámaras de aspersión de agua fría”, sin embargo la efectividad de este método dependerá de factores claves como son la temperatura y la calidad de la pulverización del agua así como la velocidad del aire en el ducto, recomendable de 4 a 6 m/s, sin embargo las capacidades de refrigeración pueden ser muy elevadas.

Para realizar un cálculo básico de aplicación de aspersores primero debemos considerar las condiciones iniciales y finales del aire así como la temperatura del agua a ser usada y realizar un balance de las cargas térmicas a considerar:

Por el lado del Aire:

Aire	WGBT (°C)	ts (°C)	th (°C)	pb (Pa)	S (J/kg aire)
Cond. Inicial	32.74	39.6	29.8	80780	112751.68
Cond. Final	26.9798474	31	25.2569249	80780	88358.14
Variación del Sigma Heat (S)				-24393.55 J/kg aire seco	
Densidad Promedio del Aire				0.87528529 kg aire seco/m3	
Flujo Volumétrico de Aire				50000 CFM	
Flujo Másico de Aire				20.6544328 kg aire seco/s	
Intercambio de Calor (Enfriamiento)				-503.834855 KJ/s = KW	

Por el lado del Agua:

Intercambio de Calor (Enfriamiento)		503.834855 KJ/s = KW
Cw (Capacidad Calorífica)		4.187 KJ/kg°C
Variación de la Temperatura		
	T inicial	10 °C
	T final	25.26 °C
Flujo Másico Total del Agua		7.88711622 kg/s
Capacidad Unitaria del Aspersor		1.5 l/s
Cantidad de Aspersores Requerida		5.3 unidades

Podemos ver el proceso psicrométrico en la siguiente ilustración.

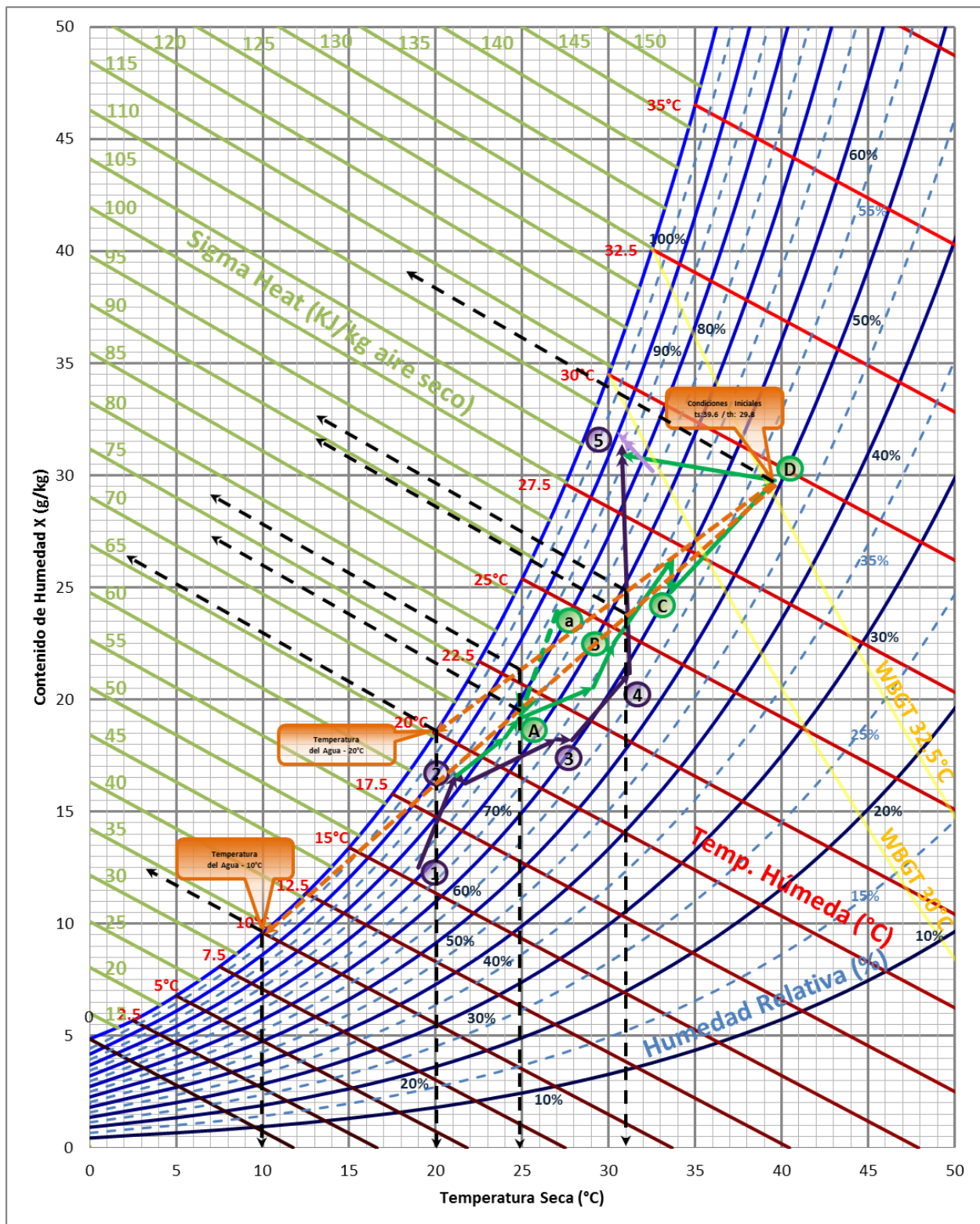


Ilustración 7: Proceso Psicrométrico de Enfriamiento de Aire mediante Aspersores.

Como podemos observar en la Ilustración 7: Proceso Psicrométrico de Enfriamiento de Aire mediante Aspersores. en conjunto con los cálculos inicialmente realizados las temperaturas t_s/t_h iniciales $39.6^{\circ}\text{C}/29.8^{\circ}\text{C}$ sin embargo al aplicar un sistema de aspersores para un caudal de 50,000 CFM con una temperatura de agua de 10°C y considerando que la calidad de los aspersores no sea muy buena, la temperatura seca será de 31°C y por sobre todo la temperatura de bulbo húmedo será de tan solo 25.25°C por lo que el índice de exposición al estrés térmico será de tan solo 27°C encontrándose dentro del LMP de exposición al estrés térmico permitiendo así realizar trabajos de manera continua sin riesgos de sufrir fatiga severa.

CONCLUSIONES

- Mediante el estudio psicrométrico realizado se pudo identificar un deficiente sistema de ventilación de la profundización, desde el punto de vista termodinámico, ya que se excedía las condiciones termo-ambientales requeridas por ley para la exposición al estrés térmico impidiendo así una elevada productividad en el desarrollo de las operaciones unitarias de minado.
- Las principales fuentes de calor identificadas en Mina Cobriza son los equipos diesel de gran dimensión, el gradiente geotérmico y la presencia de aguas termales.
- El incremento del volumen de aire en el sistema de ventilación de la profundización era necesario debido a que no se alcanzaba al volumen mínimo requerido por ley sin embargo las características térmicas del sistema así como la dificultad para contar con conexiones a superficie disponibles a la brevedad del caso conducían a la necesidad de modificar el circuito de ventilación invirtiendo la circulación inicial del aire de la mina.
- Una vez repotenciado y modificado el sistema de ventilación, se demostró con la ayuda del estudio psicrométrico que las condiciones termo-ambientales en la zona más profunda de la mina se encontraban dentro de los límites permisibles de exposición generándose así un incremento en la productividad de la zona, de igual manera se logró alcanzar la cobertura requerida por ley.
- Sin embargo existe la necesidad de continuar profundizando la mina por lo que el uso de técnicas de acondicionamiento del aire deberá ser consideradas ya que en caso contrario la velocidad de desarrollo no será congruente con la velocidad de explotación requerida por una mina de gran producción.

REFERENCIAS

1. Bluhm, S. J., & Whillier, A. (1978). The design of spray chambers for bulk cooling of the air in mines. *JOURNAL OF THE SOUTH AFRICAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY*, 1-9.
2. Honeywell International. (2007). *Engineering Manual of Automatic Controls*. Obtenido de Psychrometric Chart Fundamentals: <http://www.buildingcontrolworkbench.com/BCWInfo/GrayBook/Gpsychum.htm>
3. McPherson, M. (1993). *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*. New York: Chapman & Hall.
4. Ministerio de Energía y Minas. (2010). *DECRETO SUPREMO Nº 055-2010-EM*. Lima: EM.