

## Tabla de Contenido

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1      | Introducción .....   | 1  |
| 1.1    | Motivación .....   | 1  |
| 1.2    | Objetivos .....  | 2  |
| 1.2.1  | Objetivo General.....  | 2  |
| 1.2.2  | Objetivos Específicos .....  | 2  |
| 1.3    | Alcances .....   | 2  |
| 2      | Metodología .....  | 4  |
| 2.1    | Tipo de Minería a Analizar .....   | 4  |
| 2.2    | Determinación de la Condición de Éxito de una Ingeniería Básica .....  | 4  |
| 2.3    | Determinación del Plazo de una Ingeniería Básica en Condiciones Normales..                                   | 5  |
| 2.4    | Determinación de las Horas Hombre de una Ingeniería Básica en Condiciones Normales.....                      | 6  |
| 2.5    | Comparación Cuantitativa entre la Ingeniería Conceptual y la Ingeniería Básica en Condiciones Normales ..... | 6  |
| 3      | Antecedentes Generales .....   | 7  |
| 3.1    | Fases de un Proyecto de Inversión.....   | 7  |
| 3.1.1  | FEL 1 .....  | 9  |
| 3.1.2  | FEL 2 .....  | 10 |
| 3.1.3  | FEL 3.....   | 13 |
| 3.1.4  | Productos de la Ingeniería Básica de un Proyecto de Explotación Minera Subterránea .....                     | 13 |
| 3.2    | Caracterización Proyectos Base .....   | 23 |
| 4      | Desarrollo de la Memoria.....  | 25 |
| 4.1    | Identificación de la Información de Entrada Fundamental para la Ejecución de la Ingeniería Básica .....      | 25 |
| 4.1.1  | Geología .....   | 25 |
| 4.1.2  | Hidrogeología .....  | 26 |
| 4.1.3  | Geotecnia .....  | 27 |
| 4.1.4  | Evaluación de Recursos .....   | 27 |
| 4.1.5  | Método de Explotación .....  | 28 |
| 4.1.6  | Envolvente Económica de Reservas .....   | 29 |
| 4.1.7  | Diseño Minero .....  | 29 |
| 4.1.8  | Infraestructura Principal.....   | 30 |
| 4.1.9  | Planificación Minera .....   | 30 |
| 4.1.10 | Plan de Producción .....   | 31 |
| 4.1.11 | Sistema Manejo de Materiales .....   | 32 |
| 4.1.12 | Operaciones Unitarias .....  | 32 |
| 4.1.13 | Requerimientos de Equipos y Flota.....   | 33 |
| 4.1.14 | Programa de Desarrollo.....  | 34 |
| 4.1.15 | Requerimientos de Mano de Obra.....  | 35 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 4.1.16 | Sistema de Ventilación .....   | 35 |
| 4.1.17 | Sistema Abastecimiento de Agua Industrial .....  | 36 |
| 4.1.18 | Sistema de Drenaje .....   | 36 |
| 4.1.19 | Sistema Abastecimiento Eléctrico .....   | 37 |
| 4.1.20 | Sistema de Comunicaciones e Instrumentación.....   | 38 |
| 4.1.21 | Requerimientos de Servicios, Insumos y Materiales .....  | 38 |
| 4.1.22 | Infraestructura para Operación Mina .....  | 39 |
| 4.1.23 | Programa de Obras .....  | 40 |
| 4.1.24 | Declaración de Reservas Mineras.....   | 40 |
| 4.1.25 | Evaluación Económica .....   | 41 |
| 4.1.26 | Plan de Ejecución del Proyecto .....   | 42 |
| 4.2    | Estimación del Tiempo de Duración de una Ingeniería Básica en Condiciones Normales.....                  | 42 |
| 4.2.1  | Programación de los Contenidos de la Ingeniería Básica .....   | 43 |
| 4.2.2  | Identificación de la Ruta Crítica .....  | 51 |
| 4.2.3  | Simulación de Monte Carlo del Cronograma de la Ingeniería Básica.....                                    | 51 |
| 4.3    | Análisis de la Ingeniería Básica Según la Disponibilidad de la Información de Ingeniería Conceptual..... | 55 |
| 4.3.1  | Hidrogeología .....  | 56 |
| 4.3.2  | Geotecnia .....  | 57 |
| 4.3.3  | Evaluación de Recursos .....   | 58 |
| 4.3.4  | Validación del Método de Explotación .....   | 58 |
| 4.3.5  | Infraestructura Principal.....   | 59 |
| 4.3.6  | Sistema de Manejo de Materiales .....  | 60 |
| 4.3.7  | Operaciones Unitarias .....  | 61 |
| 4.3.8  | Requerimiento de Mano de Obra .....  | 61 |
| 4.3.9  | Sistema de Ventilación .....   | 62 |
| 4.3.10 | Sistema de Abastecimiento de Agua Industrial .....   | 63 |
| 4.3.11 | Sistema de Drenaje .....   | 63 |
| 4.3.12 | Sistema de Abastecimiento Eléctrico .....  | 64 |
| 4.3.13 | Sistema de Comunicaciones e Instrumentación.....   | 64 |
| 4.3.14 | Requerimiento de Servicios, Insumos y Materiales .....   | 65 |
| 4.3.15 | Programa de Obras .....  | 66 |
| 4.3.16 | Plan de Ejecución.....   | 66 |
| 4.4    | Análisis de la Ingeniería Básica según la Disponibilidad de Recursos Económicos .....                    | 75 |
| 4.4.1  | Estimación de las Horas Hombre de una Ingeniería Básica en Condiciones Normales .....                    | 76 |
| 4.4.2  | Determinación de los Contenidos de la Ingeniería Básica con Mayor Demanda de Horas Hombre.....           | 79 |
| 4.4.3  | Determinación de los Contenidos de Ingeniería Básica de Alto Costo Aplazables .....                      | 81 |
| 4.4.4  | Cuantificación del Impacto en la Ingeniería Básica la Postergación de Contenidos de esta Fase.....       | 82 |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 4.5 | Comparación Cuantitativa de la Duración de los Contenidos de una Ingeniería Conceptual e Ingeniería Básica en Condiciones Normales .....      | 85  |
| 4.6 | Comparación Cuantitativa de las Horas Hombre de los Contenidos de una Ingeniería Conceptual e Ingeniería Básica en Condiciones Normales ..... | 90  |
| 4.7 | Comparación Cuantitativa del Costo de Hora Hombre de los Contenidos de una Ingeniería Conceptual e Ingeniería Básica .....                    | 95  |
| 4.8 | Comparación Cuantitativa de la Dotación de una Ingeniería Conceptual e Ingeniería Básica en Condiciones Normales .....                        | 105 |
| 5   | Conclusiones y Recomendaciones.....   | 108 |
| 6   | Bibliografía.....   | 112 |
| 7   | Anexo .....   | 113 |
|     | Anexo A .....   | 113 |
|     | Anexo B .....   | 114 |
|     | Anexo C .....   | 115 |
|     | Anexo D .....   | 116 |
|     | Anexo E .....   | 117 |
|     | Anexo F.....  | 117 |
|     | Anexo G.....  | 118 |
|     | Anexo H.....  | 118 |

## Lista de Tablas

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Tabla 1:  | Duración Contenidos Ingeniería Básica Según Proyectos Reales. ....  | 44 |
| Tabla 2:  | Resultados de la Simulación de Monte Carlo de la Duración de los Contenidos de Ingeniería Básica.....             | 47 |
| Tabla 3:  | Relaciones de Precedencia y Simultaneidades de los Contenidos de la Ingeniería Básica. ....                       | 48 |
| Tabla 4:  | Resumen Plazo y Horas Hombre de los Contenidos de una Ingeniería Básica. ....                                     | 54 |
| Tabla 5:  | Información Fundamental para la Ejecución de la Ingeniería Básica de la Hidrogeología.....                        | 56 |
| Tabla 6:  | Impacto en la Ingeniería Básica de los Inputs de la Hidrogeología. ....   | 57 |
| Tabla 7:  | Información Fundamental para la Ejecución de la Ingeniería Básica de la Geotecnia.....                            | 57 |
| Tabla 8:  | Impacto en la Ingeniería Básica de los Inputs de la Geotecnia. ....   | 57 |
| Tabla 9:  | Información Fundamental para la Ejecución de la Ingeniería Básica de la Evaluación de Recursos.....               | 58 |
| Tabla 10: | Impacto en la Ingeniería Básica de los Inputs de la Evaluación de Recursos. ....                                  | 58 |
| Tabla 11: | Información Fundamental para la Ejecución de la Ingeniería Básica de la Validación del Método de Explotación..... | 58 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 12: Impacto en la Ingeniería Básica de los Inputs de la Validación del Método de Explotación.....                               | 59 |
| Tabla 13: Información Fundamental para la Ejecución de la Ingeniería Básica de la Hidrogeología.....                                  | 59 |
| Tabla 14: Impacto en la Ingeniería Básica de los Inputs de la Hidrogeología.....  | 59 |
| Tabla 15: Información Fundamental para la Ejecución de la Ingeniería Básica del Sistema de Manejo de Materiales.....                  | 60 |
| Tabla 16: Impacto en la Ingeniería Básica de los Inputs del Sistema de Manejo de Materiales.....                                      | 60 |
| Tabla 17: Información Fundamental para la Ejecución de la Ingeniería Básica de las Operaciones Unitarias.....                         | 61 |
| Tabla 18: Impacto en la Ingeniería Básica de los Inputs del Sistema de las Operaciones Unitarias.....                                 | 61 |
| Tabla 19: Información Fundamental para la Ejecución de la Ingeniería Básica del Requerimiento de Mano de Obra.....                    | 61 |
| Tabla 20: Impacto en la Ingeniería Básica de los Inputs de los Requerimientos de Equipo y Flota.....                                  | 62 |
| Tabla 21: Información Fundamental para la Ejecución de la Ingeniería Básica del Sistema de Ventilación.....                           | 62 |
| Tabla 22: Impacto en la Ingeniería Básica de los Inputs del Sistema de Ventilación....  | 62 |
| Tabla 23: Información Fundamental para la Ejecución de la Ingeniería Básica del Sistema de Abastecimiento de Agua Industrial.....     | 63 |
| Tabla 24: Impacto en la Ingeniería Básica de los Inputs del Sistema de Abastecimiento de Agua Industrial.....                         | 63 |
| Tabla 25: Información Fundamental para la Ejecución de la Ingeniería Básica del Sistema de Drenaje.....                               | 63 |
| Tabla 26: Impacto en la Ingeniería Básica de los Inputs del Sistema de Drenaje.....   | 64 |
| Tabla 27: Información Fundamental para la Ejecución de la Ingeniería Básica del Sistema de Abastecimiento Eléctrico.....              | 64 |
| Tabla 28: Impacto en la Ingeniería Básica de los Inputs del Sistema de Abastecimiento Eléctrico.....                                  | 64 |
| Tabla 29: Información Fundamental para la Ejecución de la Ingeniería Básica del Sistema de Comunicación e Instrumentación.....        | 65 |
| Tabla 30: Impacto en la Ingeniería Básica de los Inputs del Sistema de Comunicaciones e Instrumentación.....                          | 65 |
| Tabla 31: Información Fundamental para la Ejecución de la Ingeniería Básica del Requerimiento de Servicios, Insumos y Materiales..... | 65 |
| Tabla 32: Impacto en la Ingeniería Básica de los Inputs del Requerimiento de Servicios, Insumos y Materiales.....                     | 66 |
| Tabla 33: Información Fundamental para la Ejecución de la Ingeniería Básica del Programa de Obras.....                                | 66 |
| Tabla 34: Impacto de los Inputs del Programa de Obras en la Ingeniería Básica.....  | 66 |
| Tabla 35: Información Fundamental para la Ejecución de la Ingeniería Básica del Plan de Ejecución.....                                | 67 |
| Tabla 36: Impacto de los Inputs del Plan de Ejecución en la Ingeniería Básica.....  | 67 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 37: Duración de los Contenidos de una Ingeniería Básica Según Proyectos Reales.....   | 76  |
| Tabla 38: Resultado de la Simulación de Monte Carlo de las Horas Hombre de los Contenidos.....  | 77  |
| Tabla 39: Disminución de los Costos, Plazos y HH de la Ingeniería Básica, Valores P80.....  | 82  |
| Tabla 40: Resumen del Plazo y Hora Hombre de la Ingeniería Conceptual según P80 de la Curva Acumulada.....                                  | 86  |
| Tabla 41: Duración de los Contenidos de una Ingeniería Conceptual y una Básica según P80.....   | 87  |
| Tabla 42: Horas Hombre de los Contenidos de una Ingeniería Conceptual e Ingeniería Básica.....  | 91  |
| Tabla 43: Precios de Mercado del Valor de Hora Hombre por Profesional.....  | 95  |
| Tabla 44: Discretización de las Horas Hombre de los Contenidos de Ingeniería Básica por Profesional.....                                    | 97  |
| Tabla 45: Discretización de las Horas Hombre de los Contenidos de Ingeniería Conceptual por Profesional.....                                | 98  |
| Tabla 46: Resumen Comparativo del Costo de Hora Hombre Promedio de los Contenidos de una Ingeniería Conceptual y una Ingeniería Básica..... | 100 |
| Tabla 47: Horas Hombre de las Disciplinas de una Ingeniería Conceptual.....   | 105 |
| Tabla 48: Horas Hombre de las Disciplinas de una Ingeniería Básica.....   | 106 |
| Tabla 49: Dotación de Personal de la Ingeniería Conceptual e Ingeniería Básica.....   | 106 |
| Tabla 50: Resumen Comparativo de la Ingeniería Conceptual e Ingeniería Básica según P80.....  | 107 |
| Tabla 51: Estadísticas Descriptivas de los Datos de Duración de los Contenidos de la Ingeniería Básica.....                                 | 113 |
| Tabla 52: Estadísticas Descriptivas de los Datos de Horas Hombre de los Contenidos de Ingeniería Básica.....                                | 114 |
| Tabla 53: Costos Utilizados en Proyectos.....   | 115 |
| Tabla 54: Información de los Proyectos en Estudio.....  | 117 |
| Tabla 55: Dotación de Personal de la Ingeniería Conceptual por Disciplina y Total.....  | 118 |
| Tabla 56: Dotación de Personal de la Ingeniería Básica por Disciplina y Total.....  | 118 |

## **Lista de Figuras**

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Fases de un Proyecto (HATCH, 2013).....  | 8  |
| Figura 2: Marco de Desarrollo de la Ingeniería.....  | 23 |
| Figura 3: Carta Gantt de la Ingeniería Básica de un Proyecto de Explotación Subterránea.....       | 50 |
| Figura 4: Duración de la Ingeniería Básica Según Distribución PERT.....                            | 52 |
| Figura 5: Estimación de las Horas Hombre Totales de una Ingeniería Básica.....                     | 78 |
| Figura 6: Diagrama Tornado del Impacto en Costos de Postergar Contenidos.....                      | 83 |
| Figura 7: Disminución en el Plazo de Duración de la Ingeniería Básica al Postergar Contenidos..... | 83 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 8: Disminución en las Horas Hombre de la Ingeniería Básica al Postergar Contenidos..... | 84 |
|--|----|

## **Lista de Gráficos**

|   |     |
|---|-----|
| Gráfico 1: Impacto en los Plazos de la Ingeniería básica al no Contar con los Inputs Fundamentales. ....                          | 68  |
| Gráfico 2: Impacto en Plazos de la Ingeniería Básica al tener Información Incompleta de la Ingeniería Conceptual. ....            | 69  |
| Gráfico 3: Sobreestimación de Horas Hombre de la Ingeniería Básica al tener Información Incompleta de Ingeniería Conceptual. .... | 71  |
| Gráfico 4: Porcentaje de Participación en las Horas Hombres Totales de la Ingeniería Básica. ....                                 | 80  |
| Gráfico 5: Comparación de la Duración de los Contenidos de la Ingeniería Conceptual e Ingeniería Básica. ....                     | 89  |
| Gráfico 6: Comparación de las Horas Hombre entre la Ingeniería Conceptual y la Ingeniería Básica. ....                            | 92  |
| Gráfico 7: Incremento en Porcentaje de las Horas Hombre de cada Contenido entre la Ingeniería Conceptual e Ingeniería Básica..... | 94  |
| Gráfico 8: Comparación del Costo Total de la Ingeniería Conceptual y Básica en la Inversión de Capital del Proyecto.....          | 101 |
| Gráfico 9: Comparación del Costo de Hora Hombre de los Contenidos de Ingeniería Conceptual e Ingeniería Básica. ....              | 103 |
| Gráfico 10: Participación por Profesional en el Total de Horas Hombre de la Ingeniería Básica. ....                               | 116 |
| Gráfico 11: Participación por Profesional en el Total de Horas Hombre de la Ingeniería Conceptual. ....                           | 117 |

## **Lista de Ecuaciones**

|   |    |
|---|----|
| Ecuación 1: Función de Distribución de Probabilidad Beta. ....          | 45 |
| Ecuación 2: Media de la Distribución de Probabilidad Beta. ....         | 45 |
| Ecuación 3: Varianza de la Distribución de Probabilidad Beta.....       | 45 |
| Ecuación 4: Media de la Distribución Beta-PERT. ....                    | 45 |
| Ecuación 5: Varianza de la Distribución de Probabilidad Beta-PERT. .... | 45 |