

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



MEJORAMIENTO DE LA PRODUCTIVIDAD CON "REDES
OPERACIONALES CÍCLICAS Y "CONSTRUCCIÓN SIN PÉRDIDAS"-
PROYECTO INTERCEPTOR NORTE"

TOMO 1

TESIS

Para optar el Título Profesional de :

INGENIERO CIVIL

GLÉDY ALTEZ CLEMENTE
KATERIN LISSETT BOLIVAR PAYPAY

Lima - Perú

2008

ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPITULO I: GENERALIDADES.....	4
1.1. La construcción como industria.....	4
1.1.1. Importancia económica y social de la industria de la construcción.....	4
1.1.2. Características de la construcción como actividad productiva...	6
1.1.3. El rol del ingeniero civil en la administración de las operaciones de construcción.....	9
CAPITULO II: CONCEPTOS PREVIOS.....	10
2.1. Sistema.....	10
2.1.1. Estado de un sistema.....	11
2.1.2. Clasificación de un sistema.....	11
2.1.3. Estudio de sistemas.....	11
2.1.4. Parámetros de los sistemas.....	13
2.2. Los proyectos de construcción como sistema.....	13
2.2.1. Sistema de gestión de proyectos.....	14
2.2.2. Procesos de dirección de proyectos para la construcción.....	14
2.2.3. Jerarquía de la construcción.....	15
2.3. Procesos repetitivos en la construcción.....	17
CAPITULO III: TEORIA DE REDES OPERACIONALES CICLICAS...	19
3.1. Antecedentes.....	19
3.2. Simulación.....	20
3.2.1. Conceptos.....	20

3.2.2. Tipos.....	22
3.2.3. Algoritmo de simulación.....	23
3.3. Concepto de Cyclone.....	36
3.3.1. Elementos de una red de trabajo para el modelamiento de proceso.....	36
3.3.2. Diagrama del ciclo de actividad y escaneo de actividades.....	40
3.4. Software EZstrobe.....	41
3.4.1. Modelo de simulación.....	42
3.4.2. Estructurando el modelo.....	46
3.4.3. Diseño de la red operacional cíclica del modelo EZstrobe.....	47
3.4.4. Parámetros y salidas del modelo.....	48
3.4.5. Ciclo de simulación.....	51
3.4.6. Reporte e interpretación de datos.....	52
CAPITULO IV: ESTADISTICA INFERENCIAL.....	53
4.1. ¿Qué estudia la estadística inferencial?.....	53
4.2. Distribuciones muestrales.....	53
4.2.1. Población.....	53
4.2.2. Parámetros.....	53
4.2.3. Muestras.....	54
4.2.4. Muestreo.....	54
4.3. Pruebas de hipótesis.....	55
4.3.1. Premisas e hipótesis.....	55
4.3.2. Hipótesis nula.....	55
4.3.3. Hipótesis alternativa.....	56
4.3.4. tipos de error y poder de la prueba.....	56
4.4. Pruebas de bondad de ajuste.....	58
4.4.1. Grafica de probabilidad.....	59
4.4.2. La prueba de Chi Cuadrada.....	60
4.4.3. La prueba de Kolmogorov Smirnov.....	62

CAPITULO V: CONSTRUCCION SIN PERDIDA.....	64
5.1. Concepto.....	64
5.2. Objetivos de construcción sin perdida.....	65
5.3. Principios de construcción sin perdida.....	68
5.3.1. Reducir las actividades que no agregan valor (Perdidas).....	68
5.3.2. Incrementar el valor del producto a través de la consideración sistemática de los requerimientos del cliente.....	69
5.3.3. Reducir la variabilidad.....	70
5.3.4. Reducir el tiempo del ciclo.....	70
5.3.5. Simplificación disminuyendo el número de partes y pasos.....	71
5.3.6. Incrementar la transparencia de los procesos.....	71
5.3.7. Enfocar el control en el proceso completo.....	72
5.3.8. Crear el mejoramiento continuo dentro del proceso.....	72
5.3.9. Equilibrar el mejoramiento de los flujos co el mejoramiento de la eficiencia de las conversiones.....	73
5.3.10. Referenciar permanentemente los procesos (Benchmark).....	74
5.4. Calidad.....	74
5.4.1. Concepto.....	74
5.4.2. Importancia de introducir la calidad en la construcción.....	75
5.4.3. Herramientas para el control de la calidad.....	75
5.5. Productividad.....	80
5.5.1. Factores que afectan la productividad.....	80
5.5.2. Herramientas para medir la productividad.....	81
5.6. Programación sin perdida.....	82
5.6.1. Planificación maestra.....	83
5.6.2. Planificación anticipada de recursos.....	84
5.6.3. Trenes de trabajo.....	87
5.6.4. Planificación semanal.....	88
5.6.5. Planificación diaria.....	90

CAPITULO VI: CARACTERISTICAS CONSTRUCTIVAS DEL PROYECTO INTERCEPTOR NORTE.....	92
6.1. Aspectos generales del proyecto.....	92
6.1.1. Objetivos del proyecto.....	92
6.1.2. Ubicación.....	93
6.1.3. Plazo de ejecución.....	93
6.1.4. Monto de la obra.....	93
6.1.5. Concedente.....	93
6.1.6. Supervisión.....	93
6.1.7. Contratista.....	93
6.2. Descripción de la obra.....	94
6.2.1. Interceptor Norte Parte alta.....	94
6.2.2. Interceptor Norte Parte baja.....	95
6.2.3. Estación de bombeo Sarita Colonia.....	96
6.2.4. Línea de impulsión Sarita Colonia.....	97
6.2.5. Cámara de rejillas Taboada.....	97
6.2.6. Derivación de colector La Marina.....	97
6.2.7. Rebose de emergencia.....	97
6.2.8. Derivación del colector Bocanegra.....	98
6.2.9. colector Juan Pablo II.....	98
6.2.10. Derivación del colector Comas Chillón.....	98
6.3. Sistema "Pipe Jacking" o "Hincado de tubos".....	99
6.3.1. Shield de frente abierta.....	100
CAPÍTULO VII: APLICACIÓN DEL MARCO TEÓRICO (ESTADÍSTICA, CYCLONE Y CONSTRUCCIÓN SIN PÉRDIDA) EN EL PROYECTO INTERCEPTOR NORTE – TRAMO "HINCADO DE TUBOS" O "PIPE JACKING".....	136
7.1. Modelo real.....	138
7.1.1. Estadística Inferencial: Prueba de bondad de Ajuste con el programa estadístico @RISK.....	138

7.1.2.	Red Operacional de los ciclos de producción del sistema de “Hincado de Tubos” real modelado en el programa EZStrobe..	143
7.1.3.	Desarrollo de los parámetros y salidas del modelo.....	151
7.1.4.	Reporte de resultados de la simulación del modelo.....	154
7.2.	Modelo propuesto.....	160
7.2.1.	Estadística Inferencial: Prueba de bondad de Ajuste con el programa estadístico @RISK.....	160
7.2.2.	Red Operacional de los ciclos de producción del sistema de “Hincado de Tubos” propuesto modelado en el programa EZStrobe.....	163
7.2.3.	Desarrollo de los parámetros y salidas del modelo propuesto..	171
7.2.4.	Reporte de resultados de la simulación del modelo.....	174
7.2.5.	Comparación de resultados de la Simulación del Modelo Real y Propuesto del Sistema.....	177
7.3.	Análisis situacional.....	179
7.3.1.	Diagrama Causa-Efecto.....	179
7.3.2.	Diagrama de Flujo.....	180
7.3.3.	Diagrama de Control.....	181
7.3.4.	Muestreo General del trabajo.....	186
7.3.5.	Diagrama de Pareto.....	192
7.3.6.	Histograma.....	195
7.4.	Medidas a tomar.....	201
7.4.1.	Para los equipos de producción directa.....	201
7.4.2.	Para materiales.....	202
7.4.3.	Para flujos productivos.....	202
7.4.4.	Para la mano de obra (Estandarización de procedimientos).....	203
	1. Para construcción de Pozos de Empuje y salida.....	203
	1.1. Montaje de Estructuras Metálicas.....	203
	1.2. Entibado de Pozos.....	210
	1.3. Revestimiento de dos últimos niveles.....	214
	1.4. Construcción de estructuras de concreto.....	217

1.5. Montaje de estructuras metálicas de reacción y anillo de emboque.....	220
2. Montaje del Sistema de "Hincado de Tubos" o "Pipe Jacking".....	227
2.1. Montaje y nivelación de Rieles guía o Base de apoyo de Shield.....	227
2.2. Colocación de Shield sobre rieles guía.....	232
2.3. Montaje de Estación principal.....	237
2.4. Montaje del Pórtico Láser.....	242
2.5. Montaje de Tablero Hidráulico.....	245
3. Producción del Sistema de "Hincado de Tubos" o "Pipe Jacking".....	251
3.1. Excavación.....	251
3.2. Transporte Horizontal y Vertical.....	260
3.3. Hincado.....	266
3.4. Inyección de Bentonita.....	270
3.5. Colocación de Tubos de concreto armado.....	272
4. Desmontaje del Sistema de "Hincado de Tubos" o "Pipe Jacking".....	278
4.1. Extracción de Shield, Faja secundaria y Winche.....	278
4.2. Desmontaje del Tablero Hidráulico.....	283
4.3. Desmontaje del Pórtico Láser.....	290
4.4. Desmontaje de Estación Principal.....	292
4.5. Desmontaje de rieles de apoyo de Estación Principal.....	296
7.5. Programación "Sin Pérdidas" (Aplicación de la Teoría del Último Planificador).....	299
7.5.1. Elaboración de la Programación Maestra.....	299
7.5.2. Elaboración de la Programación Anticipada de recursos.....	299
7.5.3. Elaboración de la Programación Semanal.....	299
7.5.4. Elaboración de la Programación Diaria.....	299
CONCLUSIONES.....	300

BIBLIOGRAFÍA.....	308
ANEXOS.....	

ÍNDICE DE FIGURAS

N° Figura	Título	Pág.
Figura 1.1	⋮ PBI construcción y demanda interna (Promedio móvil 12m de var. % anual	5
Figura 1.2	⋮ Evolución del PBI Real Construcción 1991-2005 (Millones de Soles) - Fuente INEI (Dato preliminar)	5
Figura 1.3	⋮ Inversión pública y privada en infraestructura, Perú 1980-2005 (% del PBI)	7
Figura 2.1	⋮ Sistema Discreto	11
Figura 2.2	⋮ Sistema Continuo	11
Figura 2.3	⋮ Vías de estudio de un sistema	13
Figura 2.4	⋮ El ciclo Planificar-Hacer-Revisar-Actuar	14
Figura 3.1	⋮ Etapas de un estudio de Simulación.	21
Figura 3.2	⋮ Estructura Básica de los Modelos de Cola	23
Figura 3.3	⋮ Estructura Básica de los Modelos de Cola	25
Figura 3.4	⋮ Estados posibles del sistema de la Figura 3	26
Figura 3.5	⋮ Estados posibles para $i = 0,1,2,3$ y $j = 0,1,2$	27
Figura 3.6	⋮ Diagrama de estado con probabilidad de estado (P_k) y transición (T_{kl})	27
Figura 3.7	⋮ Sistema finito de seis unidades y un servidor.	30
Figura 3.8	⋮ Modelo Markoviano para $M = 6$ unidades	30
Figura 3.9	⋮ Modelo finito con 3 servidores, con tasas de servicio diferentes	33
Figura 3.10	⋮ Solución conceptual de costos de un modelo de espera	34
Figura 3.11	⋮ Elemento Normal	37
Figura 3.12	⋮ Elemento Combi	38

Figura 3.13	: Nodo de Cola	38
Figura 3.14	: Flecha o Arco	39
Figura 3.15	: ACD para un movimiento de tierra típico.	41
Figura 3.16	: ACD EZStrobe para un movimiento de tierra típico.	45
Figura 4.1	: Gráfica de diferencias	59
Figura 4.2	: Gráfica de Percentil-Percentil o Gráfica P-P	60
Figura 4.3	: Gráfica de Cuartil-Cuartil o Gráfica Q-Q	60
Figura 5.1	: Modelo de Conversión Tradicional	65
Figura 5.2	: Nuevo modelo de producción	65
Figura 5.3	: Proceso de mejoramiento continuo en cualquier proceso productivo.	72
Figura 5.5	: Estrategia de implementación de la Programación "Sin pérdida"	82
Figura 5.6	: Revisión de actividades antes de la Planificación Anticipada de recursos (Look Ahead Planning – LAP)	86
Figura 5.7	: Sistema de Planificación "Sin Perdidas" como un todo.	89
Figura 6.1	: Ubicación del proyecto "Interceptor Norte" en el Departamento de Lima	94
Figura 6.2	: Partes de una Retroexcavadora	105
Figura 6.3	: Alcance máximo de la Retroexcavadora en el eje vertical.	111
Figura 6.4	: Alcance máximo de la Retroexcavadora en el eje horizontal.	112
Figura 6.5	: Anillo de Empuje	114
Figura 6.6	: Placa de reacción	115
Figura 6.7	: Nivelador de base	118
Figura 6.8	: Estación de Bombeo Hidráulico	119
Figura 7.1	: Diagrama de Causa-Efecto o Diagrama de	177

	Ishikawa	
Figura 7.2	Diagrama de Flujo de Producción	178
Figura 7.3	Gráfica de Control – Llenado del Vagón - EXC	179
Figura 7.4	Gráfica de Control - Espera por comunicación y traslado del peón – E1	180
Figura 7.5	Gráfica de Control – Espera Colocación de tapa de vagón y acomodo del material - E2	180
Figura 7.6	Gráfica de Control – Salida del Vagón del Túnel- T2	181
Figura 7.7	Gráfica de Control – Espera de viga metálica para vagón - E3	181
Figura 7.8	Gráfica de Control – Izaje, Giro y Descenso del vagón lleno - T3	182
Figura 7.9	Gráfica de Control – Izaje, Giro y Descenso del vagón vacío - T4	182
Figura 7.10	Gráfica de Control - Espera por habilitación de vagón y que inicie su transporte - E4	183
Figura 7.11	Gráfica de Control- Ingreso del Vagón al túnel - T5	183
Figura 7.12	Gráfica de Control – Espera para iniciar llenado de vagón - E5	184
Figura 7.13	Promedio de participación de actividades productivas dentro de una hora de trabajo de operadores.	184
Figura 7.14	Promedio de participación de actividades contributorias dentro de una hora de trabajo de operadores.	185
Figura 7.15	Cuadro comparativo de TP, TC, TNC entre OP1- OP2	185
Figura 7.16	Promedio de participación de actividades productivas dentro de una hora de trabajo de operadores	186
Figura 7.17	Descomposición del trabajo OP1	186
Figura 7.18	Distribución del trabajo OP1	186

Figura 7.19	: Promedio de participación de actividades productivas de Peones (Cuadrilla 01)	187
Figura 7.20	: Promedio de participación de actividades productivas de Peones (Cuadrilla 02)	187
Figura 7.21	: Promedio de participación de actividades Contributorias de Peones (Cuadrilla 01)	188
Figura 7.22	: Promedio de participación de actividades Contributorias de Peones (Cuadrilla 02)	188
Figura 7.23	: Promedio de participación de actividades No Contributorias de Peones (Cuadrilla 01)	189
Figura 7.24	: Promedio de participación de actividades No Contributorias de Peones (Cuadrilla 02)	189
Figura 7.25	: Descomposición del trabajo promedio de Peones (P1, P2, P3)	190
Figura 7.26	: Descomposición del trabajo promedio de Peones (P4, P5, P6)	190
Figura 7.27	: Diagrama de Pareto para Equipos	191
Figura 7.28	: Diagrama de Pareto para Materiales	191
Figura 7.29	: Diagrama de Pareto para Mano de Obra	192
Figura 7.30	: Diagrama de Pareto para otros	193
Figura 7.31	: Histograma de Equipos	194
Figura 7.32	: Histograma de Materiales	194
Figura 7.33	: Histograma de Mano de Obra	195
Figura 7.34	: Histograma de Otros	196
Figura 7.35	: Comparación entre Horas Porcentuales y Frecuencias Porcentuales para Equipos	196
Figura 7.36	: Comparación de Horas Porcentuales y Frecuencias Porcentuales para Materiales	197
Figura 7.37	: Comparación de Horas Porcentuales y Frecuencias Porcentuales para Mano de Obra.	197

Figura 7.38	⌘	Comparación entre Horas Porcentuales y Frecuencias Porcentuales para Otros	198
Figura 7.39	⌘	Comparación entre Horas Porcentuales y Frecuencias Porcentuales Totales	198
Figura 7.40	⌘	Diagrama de flujo de producción	200
Figura 7.41	⌘	Layout Plan antes del cambio	201
Figura 7.42	⌘	Layout Plan después del cambio	201
Figura 7.43	⌘	Orden en el que serán colocados los cárcamos, grilletes y estrobos. – Elaboración propia	232
Figura 7.44	⌘	Puntos en los que serán soldados las orejas y orden en el que serán colocados los grilletes, templadores y eslinga – Elaboración propia	238
Figura 7.45	⌘	Varillas de 1" que serán soldadas entre la pared de empuje de estación principal y vigas del pozo. – Elaboración propia	239
Figura 7.46	⌘	Ubicación de eslingas y cuerdas (vientos) en el Pórtico del láser – Elaboración propia	241
Figura 7.47	⌘	Ubicación de eslingas en el Tablero hidráulico. – Elaboración propia	245
Figura 7.48	⌘	Ubicación de apoyos y soldaduras - Elaboración propia	245
Figura 7.49	⌘	Sentido de colocación de tablonos de madera de 1" x 10" para el piso – Elaboración propia	246
Figura 7.50	⌘	Excavación del hoyo de 30 cm de profundidad y 30 cm de borde.	254

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

N° Foto	Título	Pág.
Fotografía 6.1	: Shield de 2500 mm de diámetro y 5.92 m de longitud con Escudo de frente abierto	99
Fotografía 6.2	: Corona cortante	100
Fotografía 6.3	: Bloque direccional de Corona cortante	101
Fotografía 6.4	: Cilindros hidráulicos distribuidos en 4 grupos de tres cilindros Hidráulicos cada uno.	101
Fotografía 6.5	: Láser.	102
Fotografía 6.6	: Láser alojado en el pórtico.	102
Fotografía 6.7	: Canal por donde viaja láser hasta llegar al bull.	103
Fotografía 6.8	: Bull donde llega la señal del láser.	103
Fotografía 6.9	: Joysticks o Palancas de Control de la retroexcavadora	104
Fotografía 6.10	: Panel de control	104
Fotografía 6.11	: Carro	106
Fotografía 6.12	: A lado izquierdo se observa Carro y a lado derecho está el Soporte Giratorio	106
Fotografía 6.13	: Caja Interior	107
Fotografía 6.16	: Cilindro de Avance del Carro	108
Fotografía 6.15	: Cuchara de la retroexcavadora	108
Fotografía 6.16	: Cilindro de Avance del Carro	108
Fotografía 6.17	: Cilindro Giratorio	109
Fotografía 6.18	: Cilindro Elevador	110
Fotografía 6.19	: Cilindro de hoja de Cuchara	111
Fotografía 6.20	: Faja Primaria	112

Fotografía 6.21	: Faja Secundaria	113
Fotografía 6.22	: Anillo de Empuje	113
Fotografía 6.24	: Cilindros de Empuje	117
Fotografía 6.25	: Riel guía o Base de apoyo	118
Fotografía 6.26	: Nivelador de base	119
Fotografía 6.27	: Tablero Hidráulico (vista frontal)	121
Fotografía 6.28	: Tablero Hidráulico (vista inversa)	121
Fotografía 6.29	: Tubo perdido o anillo metálico	123
Fotografía 6.30	: Cilindros hidráulicos de Estación Intermedia	124
Fotografía 6.31	: Cilindros Hidráulicos	125
Fotografía 6.32	: Medias lunas	125
Fotografía 6.33	: Equipo de Bentonita	126
Fotografía 6.34	: Tanque de agua	126
Fotografía 6.35	: Mixer y Bomba de agua	127
Fotografía 6.36	: Estanque de acumulación, tablero de control de bombas y bomba de inyección.	127
Fotografía 6.37	: Accesorios	128
Fotografía 6.38	: Ventilador	129
Fotografía 7.1	: Montaje de las columnetas W 8x10.	205
Fotografía 7.2	: Montaje de la primera viga recta W18x55	206
Fotografía 7.3	: Colocación de 04 pernos A325 de 1" con sus respectivas arandelas planas.	206
Fotografía 7.4	: Alineamiento del collarín superior e inferior con uso de la plomada.	206
Fotografía 7.5	: Viga W 8x10 soldada a la viga W18x55 "tipo I" del primer anillo de fijación.	207
Fotografía 7.6	: Descenso de maderas de entibación 4"x8".	210
Fotografía 7.7	: Entibado con tablonés 4"x8" del primer nivel.	211

Fotografía 7.8	⋮ Relleno de espacios entre el entibado y el terreno, con suelo taconeado.	211
Fotografía 7.9	⋮ Taconeo del material relleno para una mejor compactación	212
Fotografía 7.10	⋮ Estructura metálica de reacción montada sobre el muro de apoyo de concreto armado.	222
Fotografía 7.11	⋮ Montaje de vigas intermedias. Vista Pared de emboque	222
Fotografía 7.12	⋮ Vigas columna montadas a cada lado del anillo de emboque	223
Fotografía 7.13	⋮ Habilitación para el vaciado de concreto detrás de la estructura metálica de reacción	224
Fotografía 7.14	⋮ Montaje del anillo de emboque.	224
Fotografía 7.15	⋮ Ubicación de estrobos de ojo con gancho de cuatro ramales de ½"	227
Fotografía 7.16	⋮ Colocación de pernos con llave de 1 ½", para unir rieles de apoyo.	227
Fotografía 7.17	⋮ Nivelación de rieles de apoyo con gatas hidráulicas de larga extensión	228
Fotografía 7.18	⋮ Establecimiento de la pendiente de riel.	228
Fotografía 7.19	⋮ Fijación de rieles para evitar desplazamientos.	229
Fotografía 7.20	⋮ Izaje de Shield con dos grúas de 50 ton	232
Fotografía 7.21	⋮ Engrasado y colocación de tapones en Shield	233
Fotografía 7.22	⋮ Corte de listones de 100 x 250 mm	234
Fotografía 7.23	⋮ Platinas soldadas en la base del Shield.	234
Fotografía 7.24	⋮ Reubicación de segmentos y soldadura de platinas de anillo de emboque.	235
Fotografía 7.25	⋮ Colocación de láser con apoyo topográfico	235
Fotografía 7.26	⋮ Colocación de Estación principal con grúa de 50 ton	238
Fotografía 7.27	⋮ Colocación de Pórtico con grúa de 50 ton	242

Fotografía 7.28	: Base 1 apoyada en viga solera.	242
Fotografía 7.29	: Orden de conexión de mangueras hidráulicas de retorno.	247
Fotografía 7.30	: Orden de conexión de mangueras hidráulicas de alimentación.	247
Fotografía 7.31	: Ubicación de mangueras hidráulicas de retorno y alimentación.	248
Fotografía 7.32	: Ubicación de mangueras hidráulicas de winche.	248
Fotografía 7.33	: Ubicación de mangueras hidráulicas de Estaciones Intermedias.	249
Fotografía 7.34	: Mando de control del sistema interno de excavación.	250
Fotografía 7.35	: Joysticks o palancas de Control de la Retroexcavadora.	250
Fotografía 7.36	: Funciones del Panel de control interno.	251
Fotografía 7.37	: Láser no coincide con la intersección de ejes.	252
Fotografía 7.38	: Verificación de rotación de la máquina con nivel de mano magnético.	253
Fotografía 7.39	: Traslado de material excavado.	255
Fotografía 7.40	: Colocación de material sobre faja primaria (vista lateral).	255
Fotografía 7.41	: Colocación de material sobre faja primaria)vista reversa=	256
Fotografía 7.42	: Transporte de material sobre la faja primaria.	256
Fotografía 7.43	: Entrega de material transportado por la faja secundaria en la vagoneta.	257
Fotografía 7.44	: Traslado de bloque de arcilla hacia la faja secundaria.	257
Fotografía 7.45	: Excavación en suelo gravosos	258
Fotografía 7.46	: Tablones de madera con Cilindros hidráulicos pequeños	260

Fotografía 7.47	: Vagoneta en proceso de llenado apoyada sobre tablones de madera.	260
Fotografía 7.48	: Colocación de la cadena a la viga metálica para su izado.	262
Fotografía 7.49	: Izado de la vagoneta llena.	263
Fotografía 7.50	: Vaciado del material excavado en el volquete de 12 m ³	264
Fotografía 7.51	: Cierre de los cilindros hidráulicos pequeños	266
Fotografía 7.52	: Panel de control de las estaciones de bombeo hidráulico de las unidades de empuje.	267
Fotografía 7.53	: Tubo de concreto armado completamente hincado y orden en el que será desmontado los accesorios.	271
Fotografía 7.54	: Desconexión de mangas de ventilación.	272
Fotografía 7.55	: Manga de ventilación deshabilitada.	272
Fotografía 7.56	: Vagoneta en espera de reinicio de producción, al término de colocación del nuevo tubo	273
Fotografía 7.57	: Mangueras hidráulicas desconectadas por colocación de nuevo tubo	273
Fotografía 7.58	: Winche del carrito móvil (Trolley).	274
Fotografía 7.59	: Se recogen los cilindros hidráulicos principales para el descenso del nuevo tubo a ser hincado.	274
Fotografía 7.60	: Lubricante Hulpe para empalme de tubos y accesorios de unión flexible y concreto.	275
Fotografía 7.61	: Tubo izado sujetado por dos estrobos.	275
Fotografía 7.62	: Tubo que esta siendo colocado sobre los rieles de la estación principal	275
Fotografía 7.63	: Sellado de agujeros con mortero.	276
Fotografía 7.64	: Ubicación de listón de acero.	279
Fotografía 7.65	: Colocación de Shield sobre la cama baja.	280
Fotografía 7.66	: Retiro de estrobos del gancho de la Grúa.	280

Fotografía 7.67	Colocación de faja secundaria sobre cama baja	281
Fotografía 7.68	Colocación de winche sobre cama baja.	281
Fotografía 7.69	Descarga de presión en válvula de retorno.	283
Fotografía 7.70	Posición parar de válvulas de cilindros hidráulicos.	283
Fotografía 7.71	Levantamiento de manguera de retorno con cuerda de 5/8" x 10 m	284
Fotografía 7.72	Orden de desconexión de mangueras hidráulicas de retorno.	285
Fotografía 7.73	Posición de mangueras hidráulicas sobre cilindros de Estación principal	285
Fotografía 7.74	Orden de desconexión de mangueras hidráulicas de alimentación.	285
Fotografía 7.75	Ubicación de mangueras hidráulicas de winche.	286
Fotografía 7.76	Posición Stop de válvula de Estación intermedia.	286
Fotografía 7.77	Corte de soldadura de Tablero hidráulico con vigas del Pozo.	288
Fotografía 7.78	Colocación de eslinga de 8" x 12 m en el gancho de grúa para izaje de estación principal.	293

LISTA DE TABLAS

N° Tabla	Descripción	Pág.
Tabla 3.1.	Actividades, condiciones y salidas de una operación de movimiento de tierra.	40
Tabla 3.2.	Variables Globales	49
Tabla 3.3.	Variables de Instancia	51
Tabla 4.1.	Errores Estadísticos	58
Tabla 5.1.	Diferencia entre los modelos	64
Tabla 5.2.	Desempeño por variables	67
Tabla 5.3.	Desempeño por proceso	67
Tabla 5.4	Desempeño por resultado	68
Tabla 5.5	Comparación entre programación tradicional y programación sin pérdida	83
Tabla 6.1	Metrado de instalación de tuberías por métodos constructivos	95
Tabla 6.2	Resumen de instalación de tubería por método constructivo	95
Tabla 6.3	Metrados de instalación de tubería por método constructivo	96
Tabla 7.1	Funciones de cada actividad	138
Tabla 7.2	Parámetros del Modelo	151
Tabla 7.3	Salidas del Modelo 01 – Horómetros	152
Tabla 7.4	Salidas del Modelo 02 – Costos / Índice de Productividad	153
Tabla 7.5	Horómetros de Equipos usados – Modelo Real	154
Tabla 7.6	Resumen de tiempos – Modelo Real	154
Tabla 7.7	Productividad Real	154
Tabla 7.8	Productividad Real con Montaje	154

Tabla 7.9	Costos Unitarios Realizados - Modelo Base	155
Tabla 7.10	Costos Unitarios Realizados - Modelo Real	157
Tabla 7.11	Análisis de Costo - Modelo Base	159
Tabla 7.12	Análisis de Costo - Modelo Real	159
Tabla 7.13	Funciones de cada actividad	160
Tabla 7.14	Parámetros del Modelo	
Tabla 7.15	Salidas del Modelo 01 - Horómetros	
Tabla 7.16	Salidas del Modelo 02 – Costos / Índice De Productividad	
Tabla 7.17	Horómetros De Equipos Usados – Modelo Propuesto	174
Tabla 7.18	Resumen de Tiempos – Modelo Propuesto	174
Tabla 7.19	Productividad en la Producción Modelo Propuesto	174
Tabla 7.20	Productividad Total – Modelo Propuesto	174
Tabla 7.21	Costos Unitarios Realizados - Modelo Propuesto	175
Tabla 7.22	Análisis Costo – Modelo Propuesto	177
Tabla 7.23	Comparación de Tiempos Modelo Real - Propuesto	177
Tabla 7.24	Comparación de Costos Modelo Base – Real - Propuesto	177
Tabla 7.25	Productividad–Cuadro Comparativo Modelo Real & Propuesto	178
Tabla 7.26	Procesos de Producción	181
Tabla 7.27	Diagrama de Pareto para equipos	192
Tabla 7.28	Diagrama de Pareto para equipos	193
Tabla 7.29	Diagrama de Pareto para Mano de Obra	194
Tabla 7.30	Diagrama de Pareto para Otros	194
Tabla 7.31	Histograma para Equipos	195
Tabla 7.32	Histograma para Materiales	196

Tabla 7.33	Histograma para Mano de Obra	197
Tabla 7.34	Histograma para Otros	197
Tabla 7.35	Comparación entre horas porcentuales y frecuencias porcentuales totales	201
Tabla 7.36	Palancas de control o "Joysticks".	253
Tabla 7.37	Conceptos previos	267

LISTA DE SIMBOLOS

<i>SIMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
Dt	: Intervalo de tiempo
β	: Tasa promedio de llegadas de unidades al sistema
\square	: Sumatoria
<	: Menor que
>	: Mayor que
<=	: Menor igual que
>=	: Mayor igual que
=	: Igual a
≠	: Diferente que
1stSt	: El tiempo en el cual la primera instancia de la actividad empezó.
LstSt	: El tiempo en el cual la última instancia de la actividad empezó.
AvDur	: El valor de duración promedio de las instancias de la actividad
SDDur	: La desviación estándar de las duraciones de las instancias de la actividad.
MinDur	: El mínimo valor de las duraciones de las instancias de la actividad.
MaxDur	: El máximo valor de las duraciones de las instancias de la actividad.
AvInt	: Es el valor de duración promedio del nuevo inicio de una instancia de actividad
SDInt	: Es el valor de desviación promedio del nuevo inicio de una instancia de actividad

Mini	⋮ Es el valor de duración mínimo del nuevo inicio de una instancia de actividad
Maxl	⋮ Es el valor de duración máximo del nuevo inicio de una instancia de actividad
SimTime	⋮ Es el último valor del reloj de simulación
Queue	⋮ Nodo de cola
Cur	⋮ El contenido actual del Nodo de cola
Tot	⋮ La cantidad total de recurso que ha entrado a un Nodo de cola
AvWait	⋮ El tiempo promedio de espera de los recursos que han entrado al Nodo de cola.
AvCont	⋮ Promedio en porcentaje de todos los tiempos en que el recurso se encuentra en estado disponible por cada ciclo de trabajo con respecto al tiempo total del ciclo.
SDCont	⋮ La desviación estándar de el contenido experimentado por un Nodo de cola
MinCont	⋮ El contenido mínimo experimentado por el Nodo de cola.
MaxCont	⋮ El contenido máximo experimentado por el Nodo de cola.
H_0	⋮ Hipótesis nula
H_1	⋮ Hipótesis alternativa
H_A	⋮ Hipótesis alternativa
α	⋮ Probabilidad que cometamos el error de rechazar la hipótesis nula aún siendo cierta.
β	⋮ Probabilidad que cometamos el error de aceptar la hipótesis nula siendo falsa.
p	⋮ Es la probabilidad de rechazar H_0 cuando es falsa.
Gráficas P- P	⋮ Gráficos de Percentil-Percentil (P-P)
Gráficas Q-Q	⋮ Gráficos de Cuartil-Cuartil (Q-Q)
hm	⋮ Hora máquina

hh	: Hora hombre
m ³	: metro cúbico
ml	: metro lineal
US \$	: Dólares
%	: Porcentaje
MO	: Mano de Obra
m ²	: Metros cuadrados
TP	: Trabajo Productivo
TC	: Trabajo Contributorio
TNC	: Trabajo No Contributoria
Ø	: Diámetro
mm	: Milímetros
C	: Cámara Interceptora
DN	: Dámetro nominal
Bar	: Bar, unidad de medición de la cantidad de presión
KN	: Kilo Newton
KW	: Kilowatios, unidad de medición de la cantidad de potencia
Kg.	: Kilogramos, unidad de medida de la masa : litros, unidad de medida de la cantidad de volumen
Hz	: Hertz, unidad de medida de la frecuencia.
rpm	: Revoluciones por minuto.
min	: Minutos, unidad de medida del tiempo.
cm	: Centímetros, unidad de medida de la longitud.
Amp	: Ampere, unidad de medida de la corriente eléctrica
mm ²	: Milímetros al cuadrado, unidad de medida del área
m	: Metros, unidad de medida de la longitud

ton	: Tonelada, unidad de medida de la masa
°C	: Grados centígrados, unidad de medida de la temperatura
°F	: Fahrenheit, unidad de medida de la temperatura
Normal (m , s)	: Función Normal (normal, desviación estándar)
Triangular (mín., moda, máx.)	: Función Triangular (mínimo, moda, máximo)
Gamma (a , b)	: Función Gamma ()
Uniform (mín, máx)	: Función Uniforme (mínimo, máximo)
Exponential (m)	: Exponencial (media)
E1	: Espera por comunicación y traslado de peón
T1	: Primer traslado
E2	: Espera colocación de tapa de vagón y acomodo de material
T2	: Salida de vagón del túnel
E3	: Espera de viga metálica para vagón
T3	: Izaje, giro y descenso de vagón lleno
T4	: Izaje, giro y descenso de vagón vacío
E4	: Espera por habilitación de vagón para inicio de transporte
T5	: Ingreso de vagón al túnel
E5	: Espera para iniciar llenado de vagón
LCS	: Límite de control superior
LCI	: Límite de control inferior
CMF	: Colocar material en la Faja primaria
EXC	: Excavar
LAM	: Lampear material y colocarlo sobre la faja primaria
CG	: Colocar Gancho para izaje del vagón

SG	⌵ Sacar Ganchos para ingreso del vagón
CT	⌵ Colocar tapa lateral de vagón
SST	⌵ Sacar seguro de tapa lateral del vagón
IB	⌵ Introducir el Brazo
GB	⌵ Girar Brazo
LB	⌵ Levantar brazo
JM	⌵ Jalar material
RM	⌵ Remover material
CMR	⌵ Comunicarse por radio
OBS	⌵ Observar frente de trabajo
VN	⌵ Verificar el nivel
JV	⌵ Accionar jalado de vagón para su ingreso al túnel
ACF	⌵ Accionar faja para traslado de material
DI	⌵ Dar indicaciones
RI	⌵ Recibir indicaciones
ST	⌵ Salida del túnel a pie
IT	⌵ Ingreso al túnel a pie
SP	⌵ Sacar Piedra
T	⌵ Traslado
JC	⌵ Jalar cuerdas guía
STV	⌵ Salida del túnel sobre el vagón
ITV	⌵ Ingreso al túnel sobre el vagón
LF	⌵ Limpiar los bordes de las fajas
JMF	⌵ Jalar material suelto sobre la faja
JPF	⌵ Jalar piedras sobre la faja
EMV	⌵ Empujar vagón al ingreso y salida de la boca del túnel

ACV	: Acomodar vagón
TH	: Traslado de herramientas
AM	: Acomodo de material transportado de las fajas al vagón
Pln	: Palanear
LM	: Levantamiento del material que cae bajo las fajas
EFL	: Espera con el frente listo
MTO	: Espera por mantenimiento o reparación
FZT	: Fuera de la zona de trabajo
P	: Parado
EBV	: Esperar que bajen el vagón
EJV	: Espera jalada de vagón
EO	: Esperar al Operario
ESV	: Esperar la salida del vagón del túnel
DP	: Dejar pasar material en las fajas
EM	: Espera de material en las fajas o en el vagón
ERV	: Espera regreso de vagón
EST	: Espera salida del peón del túnel para jalar el vagón
EVM	: Espera que bajen la viga metálica para izar el vagón
EIV	: Espera izaje de vagón
OP1	: Operario turno "A"
OP2	: Operario turno "B"
W18x55	: W Flange de acero 18x55
W8x10	: W Flange de acero 8x11
Baj_Riel.Guía1	: Bajar primer riel guía de Shield
Baj_Riel.Guía2	: Bajar segundo riel guía de Shield
Em,sol,Niv.RG	: Empernar, soldar rieles guía y nivelar

Bajar Shield	: Bajar Shield
Ins_acc.Shield	: Instalar accesorios de el Shield
Mont_C.H.p	: Montaje y traslado de cilindros hidráulicos Pequeños
Desc_vag.peq.v	: Descenso de vagón pequeño vacío al pozo
Excavar_1	: Excavar con retroexcavadora
Jalar_mat_1	: Jalar material a la faja primaria
ColMat_fajPr_1	: Colocar material en la faja primaria
Ret.1_retro.l	: Retornar la retroexcavadora a la zona de excavación
TraslMat_faja_1	: Traslado de material en la faja primaria
Iza_Gir_vagPeq	: Izaje + Giro de vagón pequeño lleno
Vac_vagPeqLI	: Vaceado de material del vagón pequeño al volquete
Tras_volq	: Traslado del volquete
Rep.volq	: Reparación del volquete
LimpVagon	: Limpieza del vagón
Emp-0.30m_C.H.p	: Empuje de 0.30m c/cilindros hidráulicos pequeños
Emp-0.60m_C.H.1	: Empuje de 0.60m c/cilindros hidráulicos principales
Desmont_C.H.p	: Desmontaje de cilindros hidráulicos pequeños
Desc_EstacPort	: Descenso de Estación Principal y Pórtico láser al pozo entrada
Mont_E.P.	: Montaje de Estación principal
Mont_Port	: Montaje de Pórtico láser
MontajeTabHid	: Montaje de tablero hidráulico
Col_láser	: Colocación de láser en el pórtico
Cam_anillMada	: Cambio de anillo de madera
Desc_accesor1	: Desconexión de accesorios del tubo: ventilación, bentonita, cable, winche
Ret_C.H.1	: Retracción de cilindros hidráulicos principales

Cam_est4xest2_1	⌘	Cambio de estrobo de 4 a 2 ramales
MontVen	⌘	Montaje de Ventilación
Iza_Gir_Tub	⌘	Izaje + Giro de tubo de concreto D = 2.5mt
Desc_tubo	⌘	Descenso de tubo de concreto D = 2.5mt
Extensión_C.H.	⌘	Extensión de cilindros hidráulicos principales
Niv_EP	⌘	Nivelacion de Estación Principal
Cam_eslxest4	⌘	Cambio de eslinga por estrobo de 4 ramales
Cam_esl_vigMet	⌘	Cambio de eslinga por viga metálica
Desc_accesor2	⌘	Desconexión de accesorios del tubo: ventilación, bentonita, cables, winche.
Cam_est4xesl_1	⌘	Cambio de estrobo de 4 ramales por eslinga
Mont_faja.sec	⌘	Montaje de faja secundaria
Ret_C.H.2	⌘	Retracción de cilindros hidráulicos principales
Cam_esl_vigMet2	⌘	Cambio de eslinga por viga metálica
Iza_Gir_vigMet	⌘	Izaje +Giro de viga metálica
ColGan_vagV	⌘	Colocar ganchos en vagón vacío
Iza_Gir_vagV	⌘	Izaje + Giro de vagón vacío
Desc_vagV	⌘	Descenso de vagón vacío
RetGan_vagV	⌘	Retiro de ganchos del vagón vacío
Repar_Grúa1	⌘	Reparar grúa por fallas mecánicas
Iza_vigMet	⌘	Izaje de viga metálica del Pozo de entrada a la superficie
ColGan_vagLI2	⌘	Colocar ganchos en vagón lleno para vaciado
Ing_vag.v	⌘	Ingreso de vagón vacío
Excavar_2	⌘	Excavar con retroexcavadora
Jalar_mat_2	⌘	Jalar material a la faja primaria
ColMat_fajPr_2	⌘	Colocar material en la faja primaria

Ret_retro_2	: Retornar la retroexcavadora a la zona de excavación
Repar_fajas	: Reparar Fajas
Ausenc_op_1	: Ausencia del operador
Repar_Retro_1	: Reparación de retroexcavadora
TraslMat_faja_2	: Traslado de material en las fajas
VacMat_vagLI	: Vaciado de material en volquete (Izaje + giro)
Desc_vig.met	: Descenso de viga metálica al pozo de empuje
Emp_EP	: Empuje con Estación Principal (0.60m)
Repar_EP_EI	: Reparación de Estación Principal
Emp_EP+E1	: Empuje con Estación Principal y Estación Intermedia 01 (0.30m)
Emp_EP+E1+E2	: Empuje con Estación Principal y Estación Intermedia 01 y 02
Sal1.5m_vagLI	: Primera salida del vagón 1.5m para colocarle tapa trasera
SalTot_vagLI	: Salida total del vagón del túnel
ColGan_vagLI1	: Colocación de ganchos en vagón lleno
Ausenc_rig	: Espera por ausencia del rigger
RetGanVagLI	: Retiro de ganchos de vagón lleno
Desc_accesor3	: Desconexión de accesorios del tubo: ventilación, bentonita, cables, winche.
Cam_vigEst2_1	: Cambio de viga metálica por estrobos de dos ramales
Tras_vagV_1	: Traslado de vagón vacío, 3m dentro del túnel
Ret_C.H.3	: Retorno de los cilindros hidráulicos principales
Hab_EmpEI1	: Habilitación de Estación Intermedia 01
Hab_EmpEI2	: Habilitación de Estación Intermedia 02
Iza_Gir_E.I.1	: Izaje + Giro de Estación Intermedia
Iza_Gir_E.I.1	: Izaje + Giro de Estación Intermedia

Instal_E.I.	⌵ Instalación de Estación Intermedia y accesorios
Cam_est2xesl	⌵ Cambio de estrobos dos ramales por eslingas
Instal_suplemet	⌵ Instalación del suple metálico
Cort_orejMet	⌵ Corte de orejas metálicas de Estación Intermedia
Extension_CH_2	⌵ Extensión de cilindros hidráulicos principales
Niv_E.P.3	⌵ Nivelación de Estación Principal y empernado de rieles
Con_accesor3	⌵ Conexión de accesorios del tubo: ventilación, bentonita, cables, winche.
Desc_accesor4	⌵ Desconexión de accesorios al tubo: ventilación, bentonita, cables, winche.
Tras_vagV2	⌵ Traslado de vagón vacío, 3m dentro del túnel
Ret_CH_4	⌵ Retorno de los cilindros hidráulicos principales
Iza_SupleMet	⌵ Izaje de suple metálico a la superficie
Con_accesor4	⌵ Conexión de accesorios del tubo: ventilación, bentonita, cables, winche.
EmpTot_3m	⌵ Empuje con Cilindros hidráulicos principio. (3mt)
Desc_accesor5	⌵ Desconexión accesorios del tubo: ventilación, bentonita, cables, winche.
Ret_C.H.5	⌵ Retorno de los cilindros hidráulicos principales
Cam_eslxest2_1	⌵ Cambio de eslinga por estrobos de dos ramales
Cam_est2xesl_1	⌵ Cambio de estrobos dos ramales por eslingas
Desmon_venVert	⌵ Desmontaje de ventilación vertical
Desmon_venHor	⌵ Desmontaje de ventilación horizontal
Corte_faja.sec	⌵ Corte de Faja sec., soldado de listones y colocación de bulones
Iza_Shield PS01	⌵ Izaje de Shield del Pozo de salida
IzaFajaSec PS01	⌵ Izaje de faja sec. Del Pozo de salida
Traslado_1 PE02	⌵ Traslado de Shield y Faja secundaria a Pozo de Entrada 02

Descenso_1 PE02	: Descenso Shield y Faja Secundaria a Pozo Entrada 02
Retorno_1 PE01	: Retorno Grúa y Cama baja a Pozo Entrada01
Iza_containers	: Izaje de containers de agua y oficina del Pozo de entrada 01
Traslado_2 PE02	: Traslado de containers de agua y oficina al Pozo de Entrada 02
Retorno_2 PE01	: Retorno de Grúa al Pozo de Entrada 01
Desm_ben E.I.01	: Desmontaje bentonita hasta Estación Intermedia.
Trans_benSup_1	: Transporte del Sistema se bentonita desmontado a superficie
Trans_madSup_1	: Transporte de maderas a superficie
IzaCH_EI01	: Izaje de cilindros hidráulicos de Estación Intermedia
Traslado_3PS01	: Traslado de la Grúa al Pozo de salida
Desm_EI01	: Desmontaje de la Estación. Intermedia 01
CortEsm_EI01	: Corte y esmerilado de la Estación Intermedia 01
Cierre_EI01	: Cierre de la Estación Intermedia 01
Desm_benEI02	: Desmontaje de bentonita hasta Estación Intermedia 02
Trans_benSup_2	: Transporte del Sistema se bentonita desmontado a superficie
Trans_madSup_2	: Transporte de maderas a superficie
Desm_EI02	: Desmontaje de la Estación Intermedia 02
CortEsm_EI02	: Corte y esmerilado de la Estación Intermedia 02
Cierre_EI02	: Cierre de la Estación Intermedia 02
Desc_ManHidr	: Desconexión de mangueras hidráulicas
Desm_benPE01	: Desmont bentonita hasta PozoEmpuje01
Trans_benSup_3	: Transporte del Sistema bentonita a superficie
Trans_madSup_3	: Transporte de maderas a superficie
Desm_Rieles	: Desmontaje de Rieles Guía

Iza_RielGuia1	: Izaje del Primer Riel Guía
Desm_EstaciónPrinc	: Desmontaje de Estación Principal
Desm_TabHidr	: Desmontaje del Tablero hidráulico
Iza_TabHidr	: Izaje de Tablero Hidráulico
Desm_PortLaser	: Desmontaje del Pórtico láser
Iza_PortLaser	: Izaje del Pórtico láser
Iza_EstPrin	: Izaje de la Estación Principal
Iza_RielGuia2	: Izaje de Segundo Riel Guía
Traslado_3PS01	: Traslado de Estación Principal, Tablero hidráulico, Port. Laser
Traslado_4	: Traslado de Estación Principal, Tablero hidráulico, Port. Laser
Grúa_1 de 50 Tn	: Grúa de 50 ton
Rigger_1	: Rigger
Grúa.2_50Tn	: Grúa de 50 ton
Pozo de empuje 01	: Pozo de empuje
Primer Riel Guía	: Primer riel guía
Segundo Riel guía	: Segundo riel guía
Equipo Topográfico	: Equipo topográfico
Shield	: Equipo de excavación
GGeneradorP	: Grupo generador pequeño
GrGenerGd	: Grupo generador grande
Tanq_hidraul	: Tanque hidráulico
Volquete	: Volquete
Cama Baja	: Cama baja
EI_Instal	: Estación intermedia instalada
Est_Interm	: Estación intermedia

SupleMet	⚙ Suple metálico
EqSoldOxicort	⚙ Equipo de soldadura oxicorte
Vag_peq	⚙ Vagon pequeno 1m3
EstaciónPrin.	⚙ Estación principal
Pórtico_láser	⚙ Pórtico láser
TableroHidraul	⚙ Tablero Hidráulico
Faja_sec	⚙ Faja secundaria
C.H.p	⚙ Cilindros hidráulicos pequenos
Camb_C.H.p	⚙ Cambio de cilindros hidráulicos pequeños
VentTubPvc	⚙ Tubería de ventilación de PVC
Man_ventil	⚙ Mangueras de ventilación
Tub_bento	⚙ Tuberia de bentonita
Maderas_rieles	⚙ Maderas y rieles
MatAc_faj.pr	⚙ Material acumulado en la faja primaria durante el uso de los cilindros pequeños
Mat_volquete >=12m3	⚙ Material acumulado en el volquete mayor a 12m3
Vag2.7 m3	⚙ Vagón grande 2.7m3
MatAc_fajPr_2	⚙ Material acumulado en la faja primaria durante el uso de la Estación principal
MatAc_vag >= 2.7m3	⚙ Material acumulado en el vagón mayor a 2.7m3
Pase_empSal.1	⚙ Pase de cierre del empuje de la fila de tubos durante la salida del vagón.
Lis_Baj.Riel2	⚙ Listo para bajar Riel Guía N° 2
List_Niv.Rieles	⚙ Listo para nivelación de rieles
List_Baj.Shield	⚙ Listo para bajar Shield (Retroexcavadora)
List_ShieldPoz	⚙ Listo Shield (Retroexcavadora) dentro del pozo
Shiled_Instal	⚙ Shield instalada
Lib_descen1	⚙ Libre para descenso

Pase_retro1	: Pase para inicios de trabajos de excavación
In_excRetro_1	: Pase para ingreso de la retroexcavadora
MatAc_vagP	: Material acumulado en vagón pequeño
List_vac.Vag.P	: Listo para vaciado de vagón pequeño
Pase_empSal.1	: Pase empuje-salida
Con_volHin1	: Contador de volumen de hincado
Camb_C.H.p	: Cambio de cilindro hidráulicos pequeños
Camb_C.H.	: Cambio de cilindros hidráulicos grandes
Con_mt.hin.1	: Contador de metros hincados por la máquina
List_Desm	: Listo para el desmontaje
List_mon.E.P.	: Listo para el montaje de la Estación principal
List_collaser	: Listo para la colocación del láser
List_cam1	: Listo para cambio estrobos-eslingas
List_montVen	: Listo para montaje de la ventilación
Habilit_list	: Habilitación lista
Con_num.tub	: Contador del número de tubos
Pase_niv1-2	: Pase para cambio de eslingas
List_cam2	: Listo para cambio estrobos-eslingas
List_izaFaj	: Listo para izaje de la faja
Lib_descens2	: Libre para descenso
Pase_izaVagLI	: Pase para izaje de vagón lleno
List_ing.vagv	: Listo para ingreso de vagón vacío
Pase P	: Pase
Pase_retro2	: Pase para inicios de trabajos de excavación
In_excRetro_2	: Pase para ingreso de la retroexcavadora
Pase_ingLib	: Pase de ingreso libre

vagLI_listVac	: Vagón lleno listo para ser vaciado
Con_vol.Hinc	: Contador de volumen hincado
Pase_empSal.2	: Pase empuje-salida
Falla_Estac	: Falla de Estación principal
List_izaVag	: Listo izaje de vagón
ColGan_vagLI1	: Vagón lleno con ganchos de eslinga colocados
Acum_mtHin	: Acumulado de metros hincados
List_camxest2_1	: Listo para cambio de estrobos
List_trasVag1	: Listo para traslado de vagón
List_izaEI	: Listo para izaje de Estación Intermedia
List_insSuple	: Listo para instalación de Suple
Pase_izaEI_Sup	: Pase para izaje de la Estación Intermedia
List_trasVag.2	: Listo para traslado de vagón
List_empTot	: Listo para empuje total
List_desmonVen	: Listo para desmontaje del sistema de ventilación
List_corteFaj2	: Listo corte de faja secundaria
List_IzaShield	: Listo para izaje de Shield (Retroexcavadora)
List_retPE01	: Retorno a pozo de empuje listo
List_desmBenEI1	: Desmontaje de bentonita hasta la EI1 listo
List_IzaShield	: Listo para izaje de Shield (Retroexcavadora)
List_desmEI_2	: Listo para desmontaje de estación intermedia
List_ManHidr	: Listo para desmontaje de mangueras hidráulicas
List_IzaTab	: Listo para Izaje de Tablero hidráulico
List_IzaPort	: Listo para izaje de pórtico láser
List_Iza_Est	: Listo para izaje de Estación Intermedia
List_Izajes	: Izajes listos

NGrua01_50t	: Número de Grúas01 de 50 ton
NGrua02_50t	: Número de Grúas02 de 50 ton
NGrup_GenPq	: Número de Generador 58 KW - 73 KVA
NGrup_GenGr	: Número de Generador Perkins 325 KVA
EqHincTub	: Número Eq.Hinc.Tub Westfalia LSK65/13 Shield-Cilindros hidráulicos-Válvulas-Estación Intermedia
NCamaBaja	: Número de Cama de Baja
NPeon	: Número de peones
NOperario	: Número de operarios
NCapataz	: Número de capataces
NSoldador	: Número de soldadores
NOficial	: Número de oficiales
NTubos	: Número de Tubos concreto PjØ2100 (Unidades)
CostGrua01_50t	: Costo de Grúa01 50t (\$/hm)
CostGrua02_50t	: Costo de Grúa02 50t (\$/hm)
CostGrup_GenPq	: Costo Generador 58 KW - 73 KVA (\$/hm)
CostGrup_GenGr	: Costo Generador Perkins 325 KVA (\$/hm)
CostEqHincTub	: Costo Equipo de Hincado de Tubos Westfalia (\$/hm)
CostCamaBaja	: Costo de Cama Baja (\$/hm)
CostPeon	: Costo de peones (\$/hh)
CostOperario	: Costo de operarios (\$/hh)
CostCapataz	: Costo de capataces (\$/hh)
CostSoldador	: Costo de soldador (\$/hh)
Costoficial	: Costo de oficial (\$/hh)
Inst_TubosTot	: Tiempo total de Instalación de 68 Tubos (h)
Inst_EstIntTot	: Tiempo Total de Instalación de 02 Estación Intermedia (h)

Hor_GenPqMon	: Horómetro de Generador 58 KW-73 KVA de Montaje (h)
Hor_GenPqProd	: Horómetro de Generador 58 KW-73 KVA de Producción (h)
Hor_GenPqDesm	: Horómetro de Generador 58 KW-73 KVA de Desmontaje (h)
Hor_GenPqTot	: Horómetro de Generador 58 KW-73 KVA Total (h)
Hor_GenGrMon	: Horómetro de Generador Perkins 325 KVA de Montaje (h)
Hor_GenGrProd	: Horómetro de Generador Perkins 325 KVA de Producción (h)
Hor_GenGrDesm	: Horómetro de Generador Perkins 325 KVA de Desmontaje (h)
Hor_GenGrTot	: Horómetro de Generador Perkins 325 KVA Total (h)
Hor_EqHinc_1m3	: Horómetro del Equipo de hincado 1 m3 (h)
Hor_EqHinc_27m3	: Horómetro del Equipo de hincado 2.7 m3 (h)
Hor_EqHincTot	: Horómetro del Equipo de Hincado Total (h)
Hor_Grua01Mon	: Horómetro de Grúa01 en Montaje (h)
Hor_Grua01Prod	: Horómetro de la Grúa01 en Producción (h)
Hor_Grua01Desm	: Horómetro de la Grúa01 en Desmontaje (h)
Hor_Grua01Tot	: Horómetro de Grúa01 de 50ton Total (h)
Hor_Grua02Mon	: Horómetro de la Grúa02 en Montaje (h)
Hor_Grua02Desm	: Horómetro de la Grúa02 en Desmontaje (h)
Hor_CamaBaja	: Horómetro de Cama Baja (h)
NHrs_Mon	: Número de horas de Montaje (h)
NHrs_Prod	: Número de horas de Producción (h)
NHrs_Desm	: Número de horas de Desmontaje (h)
NHrs_Tot	: Número de horas total (h)
NSemanas_Tot	: Número de semanas total (h)
NDias_Tot	: Dias total (días)

NHinc_ml	: Número de metros hincados (ml)
CostMaq_Mon	: Costo de Maquinaria Montaje (US \$)
CostMaq_Prod	: Costo de Maquinaria Producción (US \$)
CostMaq_Desm	: Costo de Maquinaria Desmontaje (US \$)
CostMaq_Tot	: Costo de Maquinaria total (US \$)
CostMO_Mon	: Costo de Mano de obra Montaje (US \$)
CostMO_Prod	: Costo de Mano de obra Producción (US \$)
CostMO_Desm	: Costo de Mano de obra Desmontaje (US \$)
CostMO_Tot	: Costo de Mano de obra Total (US \$)
CostMat_Tot	: Costo de Materiales Producción Total (US \$)
CostSubCont_Tot	: Costo de Subcontrato Total (US \$)
Cost_TotMon	: Costo Total Montaje (US \$)
Cost_TotProd	: Costo Total Producción (US \$)
Cost_TotDesm	: Costo Total Desmontaje (US \$)
Cost_Tot	: Costo Total (US \$)
Cost_HorMon	: Costo Montaje por hora (US \$/h)
Cost_HorProd	: Costo Producción por hora (US \$/h)
Cost_HorDesm	: Costo Desmontaje por hora (US \$/h)
Cost_HorTot	: Costo Total por hora (US \$/h)
Prod_ProdmlHor	: Productividad PJ Producción (ml/h)
Prod_ProdmlDia	: Productividad PJ producción (ml/día)
Cost_ProdUnitmL	: Costo Unitario Directo Producción por metro (US \$/ml)
Prod_TotmLHor	: Productividad PJ Total (ml/h)
Cost_TotUnitmL	: Costo Unitario Directo Total por metro (US \$/ml)
Prod_ProdTubHor	: Productividad PJ Producción (Tubo/h)
Cost_ProdUniTub	: Costo Unitario Directo Producción por Tubo (US \$/Tubo)

Prod_TotTubHor : Productividad PJ Total (Tubo/h)
Cost_TotUnitTub : Costo Unitario Directo Total por metro (US \$/Tubo)

LISTA DE TRADUCCIONES

Frase	Descripción
Lean Construction	: Construcción Sin Perdidas
Look Ahead Planning	: Planificación Anticipada de Recursos
Last Planner Theory	: Teoría del Último Planificador
Shield	: Equipo de Excavación Subterráneo
Pipe Jacking	: Hincado de Tuberías a presión usando cilindros hidráulicos
Shaft	: Pozo de entrada o salida para montaje del sistema de Hincado de Tuberías.
Trenchless	: Sistema de excavación sin zanja
CYCLONE	: Red de Operaciones Cíclicas
@RISK	: Programa para cálculo de parámetros de la estadística inferencial

RESUMEN

CAPITULO I: GENERALIDADES: Abarca el contexto actual de la construcción en el Perú, brindando un panorama completo tanto en lo social como en lo económico, siendo la antesala para definir el rol del ingeniero civil como administrador de las operaciones de construcción y ente activo en el control, análisis y toma de decisiones.

CAPITULO II: CONCEPTOS PREVIOS: Es una introducción del concepto de sistema y su enfoque en los proyectos de construcción, se definen tipos y características y se incide en el estudio de los sistemas a través del uso de modelos matemáticos y la simulación como una herramienta potente en el estudio de los modelos. Se pone en manifiesto que la naturaleza lineal y repetitiva favorece a la optimización de los recursos en los procesos constructivos.

CAPITULO III: TEORÍA DE REDES OPERACIONALES CÍCLICAS CYCLONE: Se analizan los beneficios de la simulación como técnica realista, barata, rápida y flexible en la toma de decisiones de procesos complicados en la construcción, para la definición de la variable tiempo-costos; en comparación con el modelo matemático y la simulación real. A su vez se define a la simulación como una técnica para estimar las medidas de desempeño del sistema modelado y se dan las pautas para la construcción de un modelo de simulación. Se trata en detalle el algoritmo de simulación como Teoría de colas, Modelos de transporte y asignación y el concepto de CYCLONE (Cyclic Operations Networks), técnica modeladora que permite la representación gráfica y la simulación de sistemas discretos. El concepto CYCLONE se usa en este capítulo como base para la construcción del formato gráfico del modelo de simulación en el programa EZStrobe.

CAPÍTULO IV: ESTADÍSTICA INFERENCIAL: Es la base conceptual para el muestreo en campo y para el análisis de parámetros necesarios para la simulación de los diferentes procesos constructivos. Se desarrollan las diferentes pruebas de bondad de ajuste para conocer la distribución de probabilidad de la variable aleatoria y finalmente se comprueba su validez con las gráficas de probabilidad, distribución Chi-cuadrada y la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Para lo anterior se utilizó el programa estadístico @RISK.

CAPÍTULO V: CONSTRUCCIÓN SIN PÉRDIDAS: Se desarrolla el nuevo concepto de construcción sin pérdidas, abordando sus principios desde una perspectiva más profunda y se desarrolla una programación capaz de ayudar al cumplimiento de los objetivos de la construcción sin pérdidas. Para la programación se parte de una planificación maestra y una planificación anticipada de recursos (Look ahead planning) y se llega hasta la planificación diaria y semanal, alimentando las programaciones con el uso de herramientas usadas tanto para la mejora de la calidad como de la productividad.

CAPÍTULO VI: CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS DEL PROYECTO INTERCEPTOR NORTE: En este capítulo se explica los aspectos generales del proyecto de saneamiento Interceptor Norte, también se describe la obra en toda su magnitud tanto en la Parte alta (construcción convencional y no convencional) como la Parte baja (construcción convencional) así como de las obras accesorias tales como estación de bombeo Sarita Colonia, línea de impulsión Sarita Colonia, Cámara de rejillas de Taboada, derivación del colector La Marina, rebose de emergencia, derivación de colector Bocanegra, colector Juan Pablo II, derivación del colector Comas-Chillon. Seguidamente se describe de manera detallada el sistema y funcionamiento del método constructivo no convencional Pipe Jacking, que consiste en la instalación de tubos longitudinalmente, siendo empujados por un sistema de cilindros hidráulicos especiales.

CAPÍTULO VII: APLICACIÓN DEL MARCO TEÓRICO (CYCLONE, ESTADÍSTICA Y CONSTRUCCIÓN SIN PÉRDIDA) EN EL PROYECTO INTERCEPTOR NORTE – TRAMO “HINCADO DE TUBOS” O “PIPE JACKING”

La base teórica fue aplicada específicamente en el tramo de construcción no convencional Pipe Jacking, consiste en la elaboración de las Redes Operacionales Cíclicas del sistema constructivo Pipe Jacking y su simulación en el programa EZstrobe en dos escenarios diferentes. El primero llamado modelo Real, que representa el sistema evaluado y representado gráficamente sin ninguna alteración de los procesos; el segundo llamado Modelo Propuesto, que representa el sistema antes mencionadas con mejoras en el orden y duración de los procesos. Esta segunda red nos permite estimar el impacto en tiempo y costo de los cambios a generarse antes de ser ejecutados. Para el seguimiento y control se elabora la Programación sin Pérdidas y se hace uso de los principios de construcción sin pérdidas.

INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción, ha sufrido grandes cambios en los últimos años tales como las modalidades de contratación que exigen al contratista cada vez asumir riesgos mayores, la constante innovación tecnológica, la presión sindical en aumento, la estandarización de los productos, los clientes cada día más exigentes y los plazos de ejecución cada vez más cortos. A pesar de eso, la industria de la construcción no ha cambiado la manera de gestionar, así como el modo de construir ha cambiado muy poco. Lo último es fácil de demostrar, dado que a pesar de la creciente estandarización, innovación tecnológica y buenas prácticas, ampliamente demostradas y de uso a nivel global, el índice de tiempo productivo (27%) en nuestro país se mantiene muy por debajo de países como Estados Unidos (60%) y Chile (Ghio, 2001). Ya que se ha demostrado que con la implementación de técnicas modernas de gestión pueden fácilmente conseguirse tiempos productivos de 45%.

Dado que la industria de la construcción es de producción in situ, las características particulares de cada proyecto, pueden generar la aparición de tareas inciertas, las que finalmente sin un adecuado manejo pueden tener impactos negativos. Sin embargo, con el uso de técnicas como la Simulación y la Construcción sin Pérdidas, podemos cambiar la forma en que se ejecutan los proyectos, así como brindar nuevas herramientas a la dirección del proyecto en la evaluación de actividades inciertas.

El caso práctico de aplicación de estas técnicas, fue en el proyecto de saneamiento "Interceptor Norte", proyecto que tiene por objetivo aliviar la contaminación causada por los desagües de Lima y Callao.

En el Interceptor Norte participamos como ejecutores desde un punto de vista técnico pero con herramientas de gestión que nos permitieron desarrollar el tema de tesis.

CAPÍTULO I GENERALIDADES

1.1. LA CONSTRUCCIÓN COMO INDUSTRIA

La construcción es un área de gran actividad e importancia dentro del desarrollo económico de un país.

La construcción se define internacionalmente como **la combinación de materiales y servicios para la producción de bienes tangibles**. Una de las características que la distingue de otras industrias es: su planta móvil y su producto fijo, este distinto en cada caso, además es importante proveedora de **bienes de capital fijo**, indispensables para el sano crecimiento de la economía.

1.1.1. Importancia económica y social de la industria de la construcción

Entre muchas de las razones que explican la gran importancia de este sector esta la importante actividad indirecta que genera en muchas otras áreas de la economía de un país. a satisfacción de las necesidades de infraestructura, la utilización y consumo de una cantidad importante de recursos públicos y privados, y su condición de fuente importante de trabajo a través del uso de mano de obra en forma intensiva.

La Construcción tiene gran importancia económica que se refleja en su participación en el Producto Bruto Interno (PBI) de una nación y la generación de empleo.

Como por ejemplo su porcentaje de participación en el PBI de nuestro país ha variado con un promedio mayor a 10% en los últimos tres años y que espera mantenerse los siguientes tres, siendo por este motivo considerado el segundo sector más importante de la economía del país. Si de generación de empleo se habla este representa el 5% de la fuerza de trabajo.¹ (Ver figura 1.1, 1.2 y tabla 1.1)

¹ Ministerio de Trabajo, Sectores de Trabajo, productividad y dinámica ocupacional. Capítulo 4.2

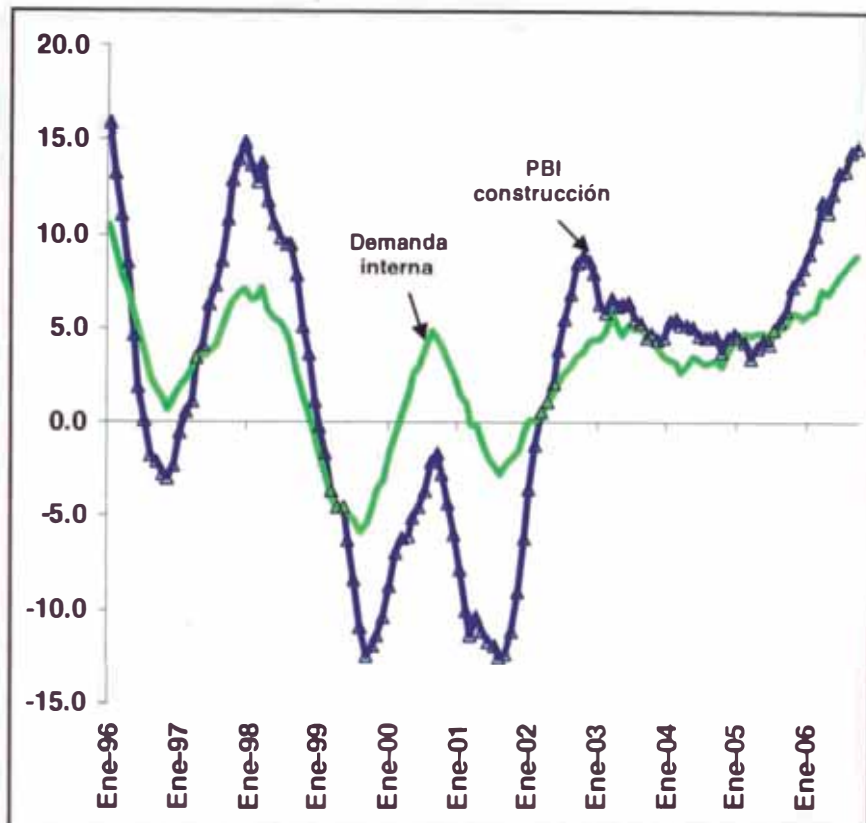


Figura 1.1: PBI construcción y demanda interna (Promedio móvil 12m de var. % anual)

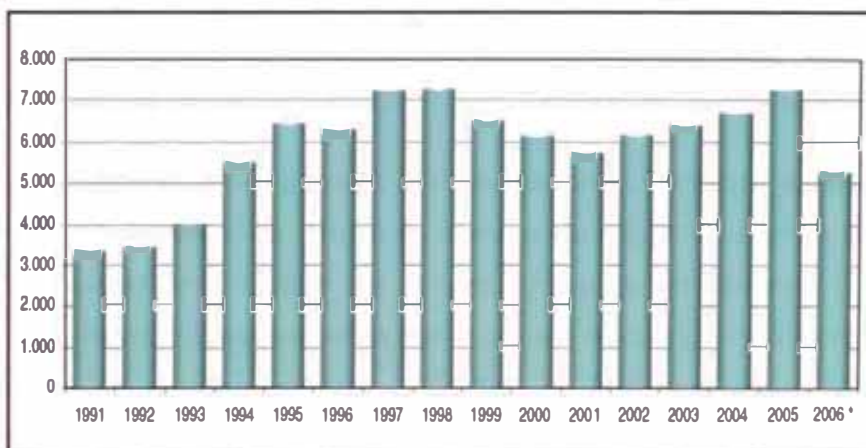


Figura 1.2: Evolución del PBI Real Construcción 1991-2005 (Millones de Soles) - Fuente: INEI (Dato preliminar)

Tabla 1.1: Crecimiento del PBI (en variación % anual) Fuente: BCRP, IPE

Sectores Económicos	2005	2006	2007	2008	2009
Agricultura	4.8	5.6	5.0	4.1	4.2
Pesca	1.2	0.6	4.9	7.6	6.5
Minería e Hidrocarburos	8.1	5.4	7.0	5.1	4.6
Manufactura	6.5	4.4	3.8	6.2	5.5
<i>Procesadores de recursos primarios</i>	2.1	1.8	1.5	4.8	3.0
<i>Industria no primaria</i>	7.7	7.0	6.0	6.5	6.2
Construcción	8.4	15.0	8.3	12.3	11.0
Comercio	5.2	10.3	6.5	4.7	5.1
Servicios	6.3	8.5	7.0	5.3	4.9

A pesar de lo anterior la construcción tanto en Perú como en la mayoría de países latinoamericanos presenta un grado menor de desarrollo frente a naciones más desarrolladas, que si han aprovechado las oportunidades que brinda el desarrollo tecnológico para resolver adecuadamente los problemas actuales.

Esto se pone de manifiesto en las variadas deficiencias y falta de efectividad que traen como resultado un gasto excesivo de los recursos involucrados en el proceso de construcción.

1.1.2. Características de la construcción como actividad productiva

La construcción como actividad productiva presenta varias particularidades, para ello la dividiremos en dos tipos, según la manera de construir. Por un lado **la estructurada**, que se lleva a cabo por el mercado de la construcción y **la no estructurada**, construcciones pequeñas pero no poco frecuentes que se realizan entre familias.²

Dentro del marco de la construcción estructurada clasificaremos a los demandantes en dos grupos. Por un lado las entidades gubernamentales encargadas de desarrollar planes de inversión en infraestructura pública y por otro lado el sector privado que demanda instalaciones para concretar sus planes

² Luís Armando López Salas; Producción sin pérdidas en la construcción, Pág. 16

de desarrollo. En el caso particular del Perú la inversión pública alcanza el 50% y la privada el otro 50%, donde el sector minero ha tenido una participación muy importante en los últimos años. (Ver figura 1.3)

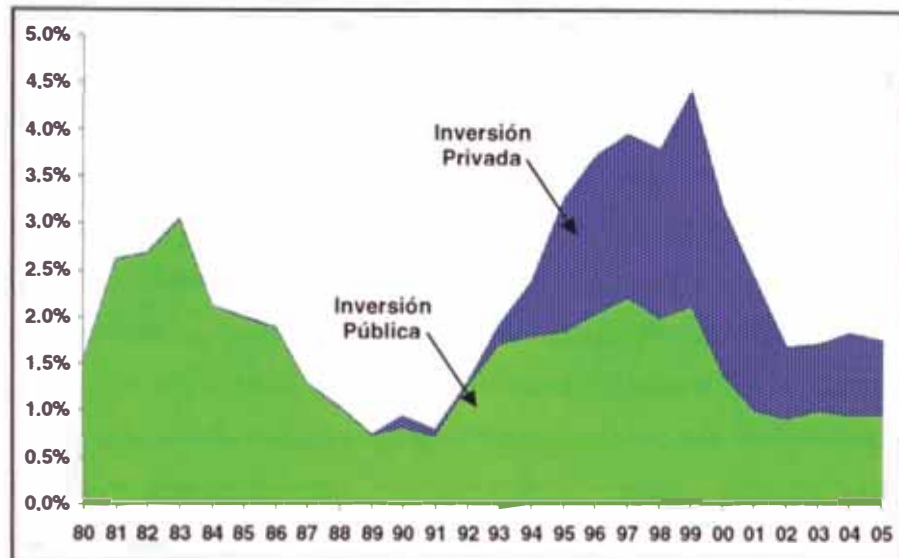


Figura 1.3: Inversión pública y privada en infraestructura, Perú 1980-2005 (% del PIB)

Tradicionalmente la industria de la construcción ha tenido un mercado local, pero con la globalización y la apertura a la inversión privada, importantes empresas constructoras transnacionales han empezado a exportar sus servicios a países más pobres, lo que desde luego es una amenaza potencial para las empresas locales.

Si se toma lo anterior como un punto de referencia para encontrar las principales respuestas a las diferencias de desarrollo, entonces discutiremos sus características más resaltantes:

Las construcciones de edificios, carreteras, puentes, presas u obras de saneamiento se desarrollan a través de **proyectos de construcción**. Defínase un **proyecto** como un esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único.³

La **naturaleza temporal** de los proyectos de construcción, hace que su duración sea limitada y que los equipos del proyecto como unidad de trabajo pocas veces perduren, lo que limita en una gran proporción la capacidad de aprendizaje tanto

³ Guía del PMBOK; Fundamentos de la Dirección de Proyectos, Introducción

del personal como de la organización, obteniéndose así una de sus características principales: **curva de aprendizaje limitada**.

La **duración limitada** y la **dinámica intensa** de las obras de construcción generan una presión de trabajo muy fuerte, que ocasiona que la planificación herramienta fundamental de la administración no se realice de forma efectiva haciéndola proclive a una gran cantidad de errores y problemas.

La **singularidad** es una característica importante de los proyectos de construcción. Cada proyecto tiene un diferente propietario, diferente diseño, diferente ubicación, diferente contratista, diferente plazo; es por estas razones que no puede realizarse una producción centralizada y rutinaria de bienes estandarizados, como es el caso de la industria manufacturera. Sin embargo, si **existe repetición a nivel de tareas u operaciones** involucradas en las fases de trabajo, sobre las cuales se pueden **mejorar los procedimientos** para lograr mayores niveles de productividad.

Por lo antes expuesto, se puede deducir que en un proyecto de construcción interactúan un gran número de personas (dueño, proyectista, contratista, subcontratista, etc.) en las diferentes etapas del proyecto con intereses divergentes que ven el beneficio particular y no el rendimiento del proyecto de manera global.

Cabe mencionar, que en la construcción se valora principalmente la experiencia de los profesionales y del personal en general, en desmedro del conocimiento, esta realidad lleva al personal a una falta de motivación a adquirir nuevos conocimientos y tecnologías, generando una desconfianza ante ideas de cambio e innovación que plantean los profesionales jóvenes.

El personal de construcción por lo general no cuenta con programas de capacitación, ya que muchas empresas le restan valor, construyendo sus bases en la experiencia o transferencia de oficio en terreno.

Por último, se encuentra como característica resaltante: **la falta de investigación y desarrollo** que ha tenido este sector en mejorar los procesos constructivos y su administración.

1.1.3. El rol del ingeniero civil en la administración de las operaciones de construcción

El ingeniero a cargo del proceso productivo administra todas las actividades del sistema a través del cual se transforman los recursos en obras tangibles. Es decir, el ingeniero administra la función de **operaciones** como responsable de producción en la toma de decisiones.⁴

En la construcción, estas decisiones pueden clasificarse en dos categorías, aquellas **críticas** que tienen un impacto importante en el éxito de la obra como decisiones sobre el diseño del proceso y/o sus modificaciones, asignación de recursos y metodologías; y aquellas que son las **decisiones del día a día**, con relación a la operación del sistema productivo como decisiones sobre asignación de personal, operaciones a realizar, técnicas, etc.⁵

De acuerdo con el tipo de decisión y sus características, se pueden usar distintos niveles de análisis. Entre ellos tenemos el uso de **la intuición** basada en la experiencia, esquema comúnmente utilizado en la construcción; **la simplificación** eliminando factores que agregan incertidumbre, por último, pero no menos importante el análisis y modelación matemática por medio de modelos y simulaciones a través de los cuales se logra hacer análisis de sensibilidad del modelo en relación con sus demás variables.⁶

En la construcción a nivel operacional, normalmente, no se cuenta con tiempo para un análisis detallado de las decisiones, por lo que muchas veces las decisiones se toman basadas en la intuición o en la experiencia por lo que los resultados no siempre son altamente efectivos. Por tal razón, es necesario contar con herramientas de planificación con datos confiables de control y análisis que sean el marco de referencia básico para decisiones posteriores, y permitan al ingeniero la toma de decisiones anticipadas y certeras.

⁴ Alfredo Serpell Bley; Administración de operaciones de construcción, Pág. 23

⁵ Alfredo Serpell Bley; Administración de operaciones de construcción, Pág. 26

⁶ Alfredo Serpell Bley; Administración de operaciones de construcción, Pág. 26

CAPÍTULO II

CONCEPTOS PREVIOS

2.1. SISTEMAS

El término sistema se utiliza habitualmente con múltiples sentidos, tantos que resulta difícil dar una definición única que englobe a todos y al mismo tiempo sea lo suficientemente precisa para servir a propósitos específicos.

Podemos partir de la siguiente definición:

Sistema es un conjunto organizado de cosas o partes interactuantes e interdependientes, que se relacionan formando un todo unitario y complejo.

Cabe aclarar que las cosas o partes que componen al sistema, no solo se refieren al campo físico (objetos), sino también al funcional y de este modo las cosas o partes pasan a ser funciones básicas realizadas por el sistema.¹

La esencia de un Sistema es una gráfica o diagrama de flujo que se forma con los elementos y las relaciones entre ellos, donde los elementos de un sistema pueden llamarse **nodos, componentes, operaciones, vértices**, etc.²

Resumiendo de la definición anterior se pueden extraer unos aspectos fundamentales del concepto Sistema:

- ✓ La existencia de elementos diversos e interconectados.
- ✓ El carácter de unidad global del conjunto.
- ✓ La existencia de objetivos asociados al mismo.
- ✓ La integración del conjunto en un entorno.

Finalmente, se puede decir que para **la Construcción un Sistema** es un conjunto organizado de elementos (hombres, máquinas) o de subsistemas (operaciones y flujos) interdependientes y dinámicamente relacionadas, cuyo objetivo común es entregar un proyecto en el menor tiempo posible, con bajos costos y cumpliendo con todos los requisitos de calidad y seguridad.

¹ Alfredo Eduardo García García; Teoría de Sistemas, Pág. 69

² Robert Lilienfeld; Teoría de Sistemas, Pág. 139

2.1.1. Estado de un sistema:

Biene determinado por el conjunto de variables necesarias para describir el sistema en cualquier instante temporal, donde cada una de las variables recibe el nombre de **variable de estado**.

2.1.2. Clasificación de Sistemas:

- ✓ **Sistemas discretos:** Son aquellos en los que sus variables de estado cambian en un conjunto de instantes de tiempo contable (finito o infinito numerable). (Ver figura 2.1)

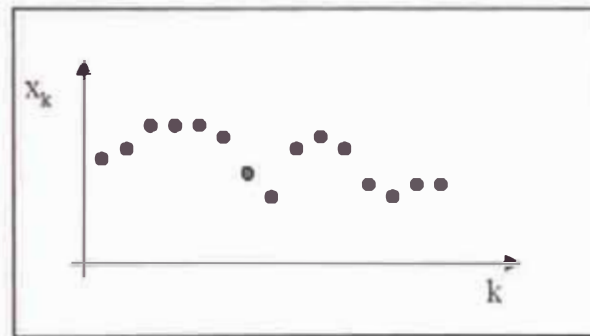


Figura 2.1: Sistema Discreto

- ✓ **Sistemas continuos:** Son aquellos en los que sus variables de estado cambian de manera continua a lo largo del tiempo. (Ver figura 2.2)

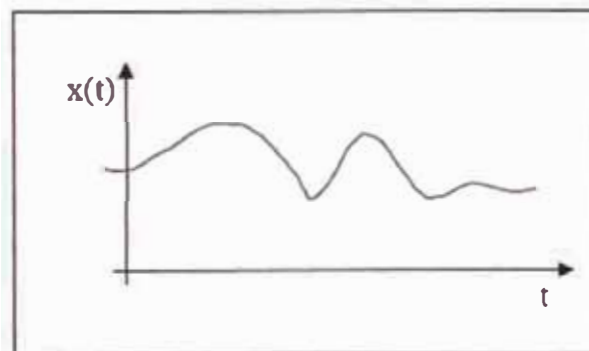


Figura 2.2: Sistema Continuo

2.1.3. Estudio de Sistemas:

Los sistemas se estudian de dos formas

- ✓ **Realizando experimentos sobre el sistema:** Estos experimentos sólo se pueden realizar cuando se dispone del sistema y cuando es posible alterar sus condiciones de funcionamiento. Por tanto, esta solución no es aplicable cuando los estudios se realizan antes de disponer del sistema, o bien cuando el coste de modificación de las condiciones de funcionamiento resulta muy elevado.
- ✓ **Realizando experimentos sobre un modelo del sistema:**

Modelo:

Es la representación de un sistema construido con el propósito de estudiarlo, normalmente, se clasifica en:

Modelo Físico: Estos modelos son muy usados en la industria aeronáutica y del automóvil. Pero en general y dada la naturaleza del problema, este tipo de modelos tiene poco interés en el análisis de sistemas.

Modelos Matemáticos: Estos modelos representan un sistema mediante un conjunto de relaciones cuantitativas y lógicas entre sus componentes, permitiendo observar cómo se comporta el modelo del sistema cuando cambia alguno de sus componentes.

Si el modelo es suficientemente sencillo, será posible obtener una solución analítica que relacione las magnitudes de interés. Sin embargo, la elevada complejidad de muchos sistemas reales imposibilita la obtención de modelos suficientemente ajustados con soluciones analíticas o en caso de obtenerlas, la carga computacional que conllevan desaconseja su uso. En este último caso el modelo debe estudiarse de forma aproximada recurriendo a su **simulación**. (Ver figura 2.3)

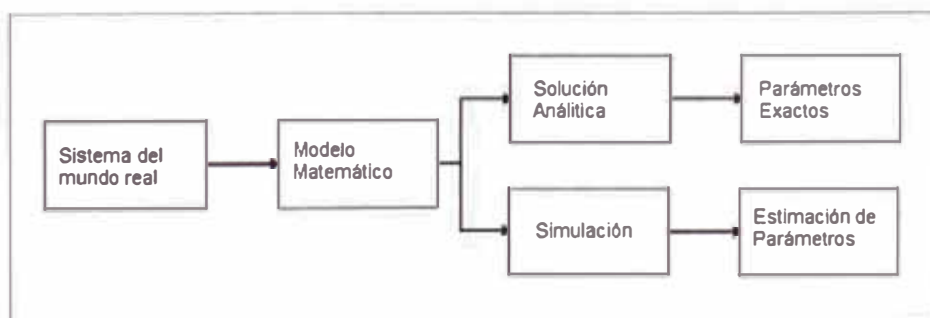


Figura 2.3: Vías de estudio de un sistema

Solución analítica: Supone analizar totalmente el modelo del sistema y obtener una solución que valdrá para todo momento y para obtener cualquier parámetro de interés.

Simulación: Se recrea una o varias evoluciones temporales del modelo con el fin de estimar un conjunto de parámetros. Los modelos de simulación son modelos matemáticos que permiten obtener una estimación del comportamiento del sistema para una configuración determinada.

2.1.4. Parámetros de los Sistemas

Estos parámetros son constantes arbitrarias que se caracterizan por sus propiedades, el valor y la descripción que puede dar de un sistema específico o de un componente del sistema.

Los parámetros de los sistemas son los siguientes:

- ✓ **Entrada:** Es la fuerza de arranque o de partida del sistema.
- ✓ **Proceso:** Es el mecanismo de conversión de las entradas en salidas.
- ✓ **Salida:** Es la finalidad para la cual se reunieron elementos y relaciones del sistema.
- ✓ **Retroalimentación:** Es la función del sistema que tiende a comparar la salida con un criterio o un estándar previamente establecido.
- ✓ **Ambiente:** Es el medio que envuelve externamente el sistema.

2.2. LOS PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN COMO SISTEMA

Para empezar definiremos que es un proyecto, un **proyecto** es un esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único.

Temporal significa que cada proyecto tiene un comienzo definido y un final definido. El **final** se alcanza cuando se han logrado los objetivos del proyecto o

cuando queda claro que los objetivos del proyecto no serán o no podrán ser alcanzados.³

La presencia de elementos repetitivos no cambia la condición fundamental de único del trabajo de un proyecto.⁴

2.2.1. Sistema de Gestión de proyectos

El sistema de gestión de proyectos es el conjunto de herramientas, técnicas y metodologías, recursos y procedimientos utilizados para gestionar un proyecto.

2.2.2. Procesos de Dirección de Proyectos para un Proyecto

La dirección de proyectos se logra mediante la ejecución de procesos, usando conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas de dirección de proyectos que reciben entradas y generan salidas.

Los detalles específicos de un proyecto se definen como objetivos que deben cumplirse sobre la base de la complejidad, el riesgo, el tamaño, el plazo, la experiencia del equipo del proyecto, el acceso a recursos, la cantidad de información histórica, la madurez de la organización en la dirección de proyectos, la industria y área de aplicación. Un ciclo subyacente a la interacción entre los procesos de dirección de proyectos es el ciclo planificar-hacer-revisar-actuar. Este ciclo está vinculado por los resultados, es decir, el resultado de una parte del ciclo se convierte en la entrada de otra. (Ver figura 2.4)

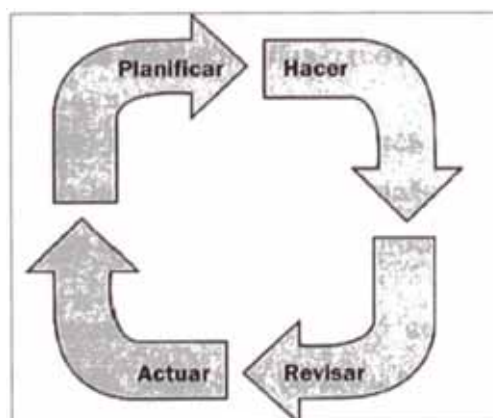


Figura 2.4. El ciclo Planificar-Hacer-Revisar-Actuar

³ Guía del PMBOK; Fundamentos de la Dirección de Proyectos, Pág. 5

⁴ Guía del PMBOK; Fundamentos de la Dirección de Proyectos, Pág. 6

El diagrama de flujo de procesos ofrece un resumen general de las interacciones y del flujo básico entre los Grupos de Procesos. Un proceso individual puede definir y restringir la forma en que se usan las entradas para producir las salidas de ese grupo de procesos. Un grupo de procesos incluye los procesos de dirección de proyectos que están vinculados por las respectivas entradas y salidas, es decir, el resultado o salido de un proceso se convierte en la entrada de otro.

2.2.3. Jerarquía de la construcción

- ✓ **Organizacional:** El nivel organizacional está relacionado con la estructura legal y comercial de la firma, las diferentes áreas de gerenciamiento y la interacción entre la oficina central y los agentes de campo, en la interpretación de las funciones administrativas.
- ✓ **Proyecto:** Está relacionado con la descomposición del proyecto con el propósito de controlar tiempo y costo.
- ✓ **Actividad:** Es un tiempo y recurso consumido para un elemento del proyecto normalmente definido para controlar el tiempo y el costo, ya sea por un planificador o ingeniero de costos.

Una actividad es única y debe ser finalizada una vez, sin embargo, está culminación puede requerir el desarrollo repetitivo de un número de operaciones o procesos, algunos de los cuales pueden ser únicos para esta actividad. Las actividades representan una porción significativa del proyecto y tienen una duración de días, semanas o meses.

- ✓ **Operación y Proceso:** El nivel de operaciones y procesos de construcción está relacionado con la tecnología y el detalle de cómo se comporta la construcción, el mismo que se focaliza en el trabajo a nivel de campo.

Usualmente una operación de construcción es tan compleja que abarca varios procesos distintos, cada cual tiene su propia tecnología y secuencia de tareas de trabajo. Sin embargo, para situaciones simples que envuelven un solo proceso, los términos son sinónimos.

La distinción entre una actividad y una operación está firmemente relacionada con la duración de la función.

La operación es sin embargo mucha más fundamental para un entendimiento de los métodos de campo.

Algunas veces un microanálisis de una operación o proceso de construcción es útil y es emprendido en el campo cuando un proceso altamente repetitivo es requerido para un trabajo de gran magnitud.

Un proceso de construcción está definido como una colección única de tareas de trabajo relacionadas entre ellas a través de una secuencia y estructura tecnológica, la cual emplea insumos con el fin de darles valor agregado y crear un producto nuevo que será suministrado a un cliente externo o interno.

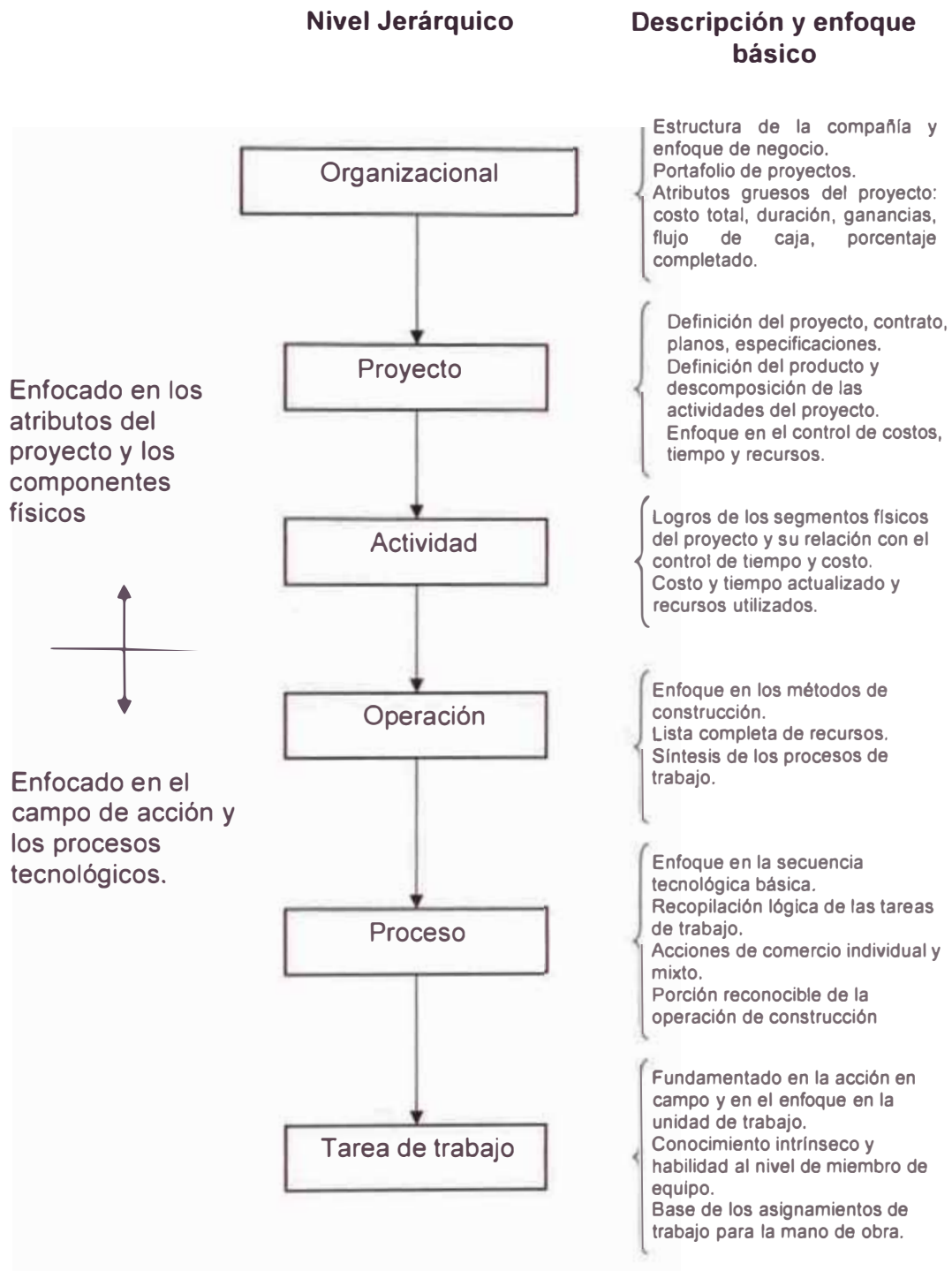
El tiempo de duración de un ciclo básico en una operación de construcción puede ser medido en días o en horas.

- ✓ **Tarea:** El nivel de tarea está relacionado con la identificación y asignación de porciones elementales de trabajo para los agentes de campo.

Una tarea de trabajo es la unidad de descripción básica en la práctica de la construcción. Si una tarea de trabajo es descompuesta en sus componentes, las consideraciones del factor humano o el detalle de los movimientos estarían involucrados, lo que significaría un microanálisis de movimientos y acciones.

Las tareas de trabajo son por consiguiente los bloques de construcción base de los procesos y operaciones.

Un asignamiento de trabajo es la colección de tareas de trabajo específicamente asignadas a un miembro del equipo para su desempeño.



2.3. PROCESOS REPETITIVOS EN LA CONSTRUCCIÓN

Los procesos cíclicos usualmente dependen de una repetición de tareas, requeridas para producir una parte final del proyecto. Un proceso no cíclico seria una secuencia única, que no es repetitiva. La colocación de una caldera grande es un proceso no repetitivo. Por otro lado, la colocación de losas de suelo en un rascacielos, tiende a ser de naturaleza repetitiva.

Los proyectos que evidencian una naturaleza lineal con frecuencia dependen de ciclos o secuencias repetitivas de trabajo. Ejemplos típicos son la pavimentación de caminos, la construcción de un túnel, colocación de paneles prefabricados en rascacielos, etc.

Claramente, la repetición es deseable porque lleva a la eficiencia en la utilización del recurso.

En la industria manufacturera, la piedra angular de la producción en masa es la secuencia repetitiva del trabajo a ser realizado. Esto está basado en la estandarización del producto a ser creado. La estandarización y la modularización son conceptos históricamente muy conocidos para los materiales de construcción (ejemplo: ladrillos y bloques, paneles "dry wall") El concepto de estandarización para lograr la repetitividad es la base del costo-eficiencia en la construcción, lo cual también lleva a obtener altos estándares de calidad.

Tiempo de ciclo del proceso

"El tiempo de ciclo es la cantidad total de tiempo que se requiere para completar el proceso"⁵.

"El tiempo de ciclo del proceso es considerado como una medida de la eficiencia y defínase eficiencia como: la capacidad de disponer de alguien o algo para conseguir un efecto determinado"⁶

⁵ Cfr. Harrington 1993, pág. 138

⁶ Diccionario de la Real Academia Española

CAPÍTULO III

TEORÍA DE REDES OPERACIONALES CÍCLICAS - CYCLONE

3.1. ANTECEDENTES

En el diseño de la construcción hay a menudo que tomar decisiones de procesos complicados. Estas decisiones incluyen la determinación de tamaños de cuadrilla, selección de equipos, establecimiento de un manejo lógico o selección de métodos constructivos. Asociados con cada decisión están una serie de resultados como el costo de la construcción y el tiempo. Las decisiones están hechas sobre la base de resultados esperados.

Varias técnicas están disponibles para obtener resultados asociados con un método particular. La experimentación con el sistema real, en un extremo, es muy realista pero es cara, lenta, carece de generalidad y es algunas veces imposible de hacer. El modelo matemático, en el otro extremo, es muy preciso pero requiere que los aspectos importantes del proceso no sean omitidos, un alto grado de habilidad matemática y se pone demasiado complicado para situaciones de la construcción reales. La simulación es la tercera técnica. Es muy conveniente porque al ser realista, es también barata, rápida y flexible.

Los modelos creados en lenguajes generales de programación pueden representar casi cualquier proceso real. Pueden estar hechos a la medida para los requisitos muy precisos del modelo en cuestión y puede trabajar muy rápido. Su uso en construcción ha sido demostrado con modelos para la selección de equipos, para la valoración de tiempos inciertos y costos de movimiento de tierras en construcción, para la estimación de duración de proyectos, para la evaluación de estrategias de fijación de recursos y para el modelado de condiciones geológicas subterráneas.

Las herramientas específicas de simulación pueden ser clasificadas como simuladores o como lenguajes de simulación (Law and Kelton 1991). Los simuladores son paquetes de computador que permiten la simulación de una clase específica de sistemas con poco o nada de programación, mientras los lenguajes de simulación son muy generales, aunque pueden caracterizarse para modelar cierto tipo de aplicaciones. En general, los lenguajes de simulación tienen la habilidad de modelar casi cualquier tipo de sistema.

Los simuladores y lenguajes de simulación pueden adoptar uno de los diferentes métodos o estrategias. Existen tres estrategias que son generalmente reconocidas: **Orientación por Eventos (ES)** es gobernada por un calendario y ejecución de subrutinas (eventos) que como consecuencia programa la ejecución de otras subrutinas; **Orientación de Seguimiento de Actividades (AS)** se enfoca en identificar las actividades y las condiciones bajo las cuales la actividad puede realizarse y **Orientación de Interacción de Procesos (PI)** es desarrollada desde el punto de vista de las entidades (transacciones) que fluyen en el sistema.

Los ingenieros civiles y constructores utilizan dibujos y gráficas con el objetivo de visualizar los problemas y especificar detalles. Las mallas son una forma gráfica de comunicar conceptos complejos que de otra manera requerirían de una explicación muy larga. Las herramientas basadas en AS hacen uso de mallas que consisten en nodos (actividades y colas) conectados por arcos, que describen el modelo de simulación. La mayoría de herramientas estudiadas combinan estrategias AS y ES, conocido como las Tres-Fases AS (Tocher and Owen 1960), que distingue entre actividades condicionales (actividades o combis) y actividades con límites (actividades o normal).

3.2. SIMULACIÓN

3.2.1. Conceptos

La Simulación es un proceso modelador que imita un sistema real o imaginario y dinámico.¹

También se puede decir que la simulación no es una técnica de optimización, más bien, es una técnica para estimar las medidas de desempeño del sistema modelado.²

La simulación con computador es por lo tanto una técnica que realiza experimentos en un computador con un modelo de un sistema dado. El modelo es el vehículo utilizado para la experimentación en sustitución del sistema real. Los experimentos pueden llegar a tener un alto grado de sofisticación que

¹ Julio C. Martínez; Stroboscope, Pág. 5

² Hamdy A. Taha; Investigación de operación, Pág. 673

requiera la utilización de técnicas estadísticas de diseño de experimentos. En la mayor parte de los casos los experimentos de simulación son la manera de obtener repuestas a preguntas del tipo "¿qué pasaría sí?", preguntas cuyo objetivo suele ser evaluar el impacto de una posible alternativa que sirva de soporte a un proceso de toma de decisiones sobre un sistema.

La Simulación implica varias etapas entre ellas: (Ver figura 3.1)

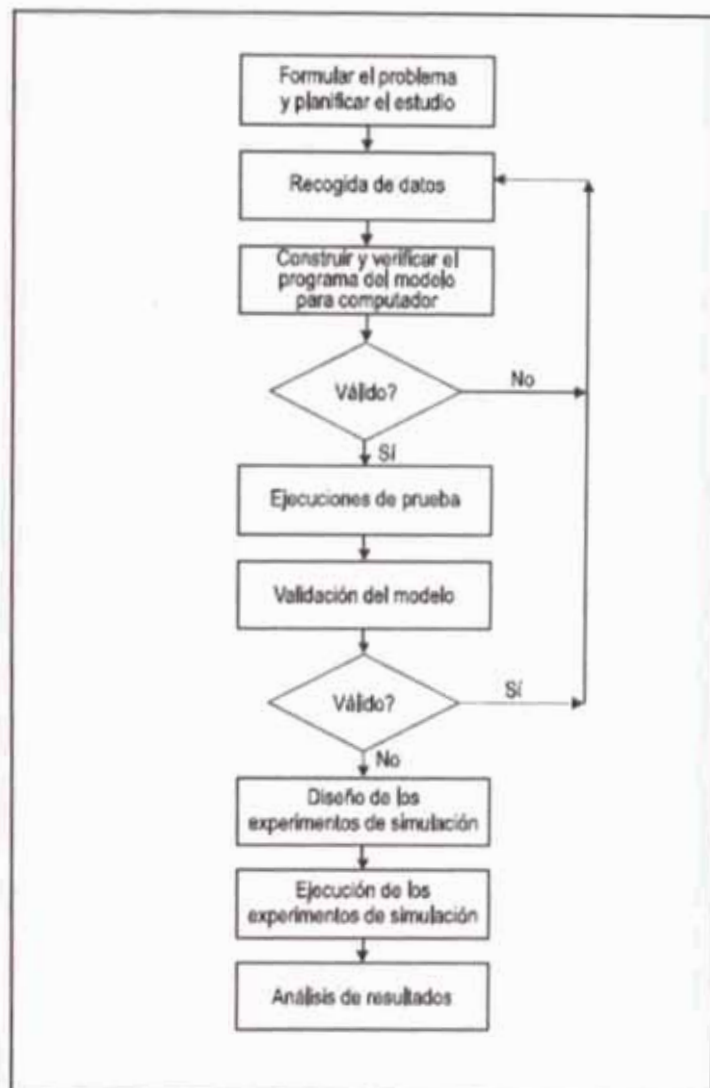


Figura 3.1: Étaps de un estudio de Simulación.

1. Definición del problema y planificación del estudio.
2. Recogida de datos.
3. Formulación del modelo matemático.
4. Construcción y verificación del programa para computador del modelo.
5. Ejecuciones de prueba del modelo.

6. Validación del modelo.
7. Diseño de los experimentos de simulación.
8. Ejecución de los experimentos.
9. Análisis de los resultados.

El proceso no es en general secuencial, sino iterativo, en el que algunos de los pasos pueden tener que repetirse en función de los resultados intermedios.

3.2.2. Tipos

Simulación Discreta

En este tipo de simulación el tiempo es un elemento discreto, y se representa como puntos no continuos, lo que permite ver como va el proceso en los momentos en que se determine y no durante todo el tiempo de ejecución, es por ello que es muy importante establecer un método o estrategia adecuado para determinar dichos instantes.

La simulación discreta puede ser:

Simulación Orientada por Eventos

La simulación orientada por eventos es muy eficiente y se basa en la programación y ejecución de eventos, lo que significa que el reloj se actualiza cada vez que algo ocurre y la ejecución del modelo genera la información necesaria y suficiente para entender el proceso.

Orientación de Seguimiento de actividades

La simulación basada en la orientación de seguimiento de actividades se enfoca en identificar constantemente las actividades y el cumplimiento de sus respectivas condiciones para llevarlas a cabo; es muy útil, práctica y usada para modelar procesos.

Simulación Continua

Este tipo de simulación considera el tiempo como un elemento continuo en donde el estado del sistema es representado por variables dependientes que están en función del tiempo.

Un sistema discreto es aquel en el cual las variables de estado cambian solo en puntos discretos o contables en el tiempo.

3.2.3. Algoritmo de Simulación

Varios modelos de investigación son aplicables en la administración de la construcción. Se revisara aquellos que aparecen como más prácticos y versátiles y cuya aplicación es más directa en el ámbito de la construcción, como son los siguientes: Teoría de colas, Modelos de transporte y asignación.

Teoría de Colas

La mayoría de estudios de simulación contempla el modelado de colas. Por esta razón, se considera conveniente adquirir conocimientos básicos sobre la teoría de colas. Para modelos simples, la teoría de colas nos puede ayudar a analizar el comportamiento del modelo sin necesidad de utilizar la simulación. Para modelos complejos, los conceptos ligados a la teoría de colas nos puede facilitar el análisis de resultados de la simulación.

Un sistema de colas está formado por uno o más servidores, que proporcionan servicios a los clientes que llegan. Si estos encuentran los servidores ocupados, pasan a ocupar una posición de espera, frente a los servidores.

Los fenómenos de espera son comunes en todos los procesos industriales y particularmente en los procesos u operaciones de la construcción. Este modelo permite analizar el diseño y la operación de éstas.

Una ilustración general de los modelos de líneas de espera se muestra en la Figura 3.2 en la que se identifican los principales componentes. Los parámetros asociados a estos componentes, permiten definir una clasificación de estos sistemas.

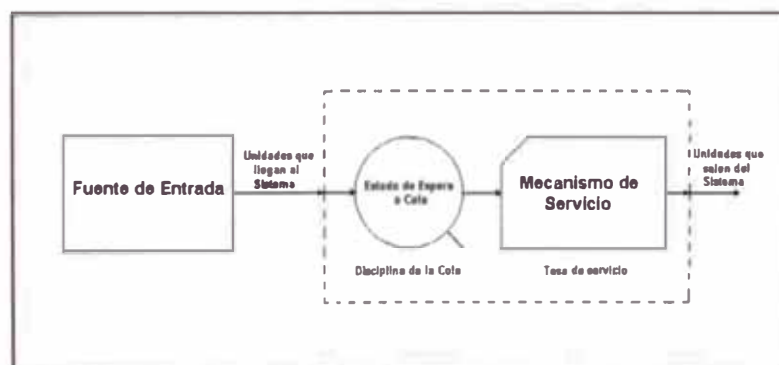


Figura 3.2: Estructura Básica de los Modelos de Cola

Fuente o entrada

Los clientes que entran al sistema se generan a través del tiempo en una fuente de entrada.

Tamaño de la Población: Es el número total de clientes que pueden requerir servicio en determinado momento, es decir, el número total de clientes potenciales distintos (puede suponerse que el tamaño es infinito o finito).

La población finita, se refiere al grupo de clientes de tamaño limitado que utilizará el servicio y que, en ciertos momentos, hará fila.

La población infinita, es aquella lo bastante grande con relación al sistema de servicio como para que el cambio de tamaño, ocasionado por sustracciones o adicionales a la población, no afecte significativamente la probabilidad del sistema.

Forma de las llegadas: Patrón estadístico mediante el cual se generan los clientes a través del tiempo.

La suposición normal es que los clientes se generan de acuerdo con un proceso POISSON.

Esto equivale a decir que el tiempo entre dos llegadas consecutivas tiene una distribución de probabilidad exponencial.

Cualquier otra suposición, como por ejemplo que un cliente desista de entrar a la cola por estar demasiado largo, debe especificarse en el modelo.

Estado de Espera o Cola

Una cola se caracteriza por el número máximo de clientes que se pueden admitir.

Tamaño de la cola: Una cola puede ser finita o infinita. El estándar es infinito.

Disciplina de la cola: Se refiere al orden en el que se seleccionan sus miembros para recibir el servicio.

Mecanismo de Servicio

El mecanismo de servicio consiste en una o más instalaciones de servicio.

Canal: Hace referencia al número de servidores que hay en el sistema. Y pueden ser: Canales de servicio en serie, Canales de servicio en paralelo.

Tiempo de servicio: Es el tiempo que transcurre desde el inicio del servicio para un cliente hasta su terminación.

Un modelo de sistema de colas debe especificar la distribución de probabilidad de los tiempos de servicio para cada servidor.

La distribución más usada para los tiempos de servicio es la exponencial, aunque es común encontrar la distribución degenerada o determinística (tiempos de servicio constantes) o la distribución Erlang (Gamma).

Para los procesos de construcción interesa analizar el modelo de líneas de espera de población finita, debido a que las unidades a ser servicio son limitadas. A continuación, un modelo de población finita se entrega (Número de Camas baja a cargar con tubos, número de Volquetes a cargar con material), el cual podría ser aplicado a cualquiera de los ejemplos mencionados, como se verá mas adelante. (Ver Figura 3.3)

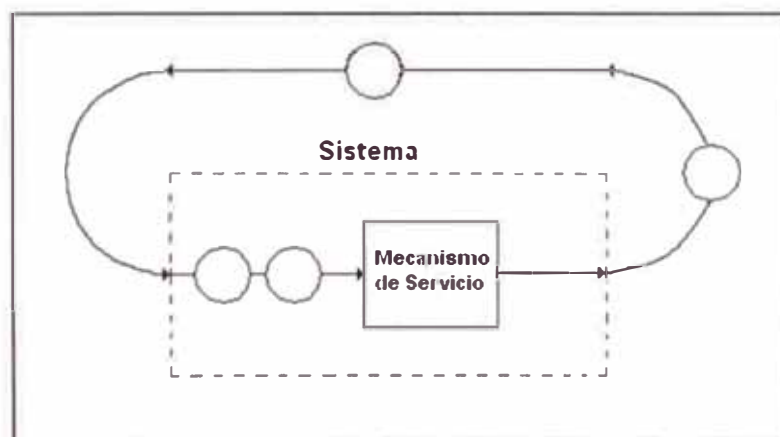


Figura 3.3: Estructura Básica de los Modelos de Cola

Desarrollo conceptual del modelo

Los sistemas tienen una serie de variables, las cuales sirven para describir sus estados. Estas se denominan variables de estado.

Un estado particular del sistema puede ser identificado cuando los valores de variables de estado se encuentran fijos, sin presentar ningún cambio. Cuando alguno de estos valores cambia, se puede decir que el sistema ha cambiado de estado.

En los modelos de teoría de colas, los sistemas son descritos con facilidad ya que la identificación de estados se hace a través del número de unidades dentro del sistema. Por ejemplo, si se tiene una población finita de 5 unidades y una de estas se encuentra dentro del sistema, entonces el estado estaría definido de la siguiente manera: E_1 . La letra "E" significa estado y el subíndice indica el número de unidades dentro del sistema. Para el ejemplo mencionado, se podría decir que el número de estados a identificar es seis para cinco unidades de población. El número de estados está dado por la cantidad de unidades de población (M) más uno (M+1).

(Ver Figura 3.4)

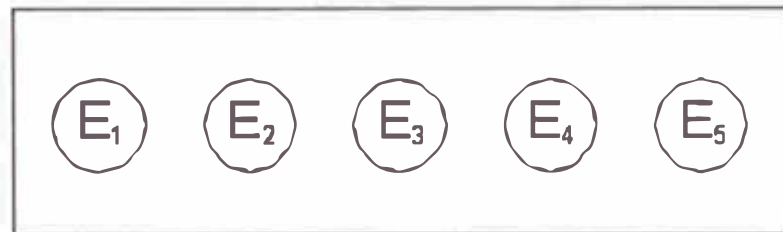


Figura 3.4: Estados posibles del sistema de la Figura 3

Si se tiene más de un parámetro, el número de estados estará en función al producto del número de valores correspondiente a cada parámetro. Por ejemplo, para dos parámetros, el número de estados sería:

$$E_{ij} = n_i \times m_j$$

Donde:

n_i : Número de valores posibles de i

m_j : Número de valores posibles de j

Para definir este tipo de sistema pueden usarse dos parámetros; el parámetro "i" que corresponderá a las unidades en el sistema y el

parámetro "j" que indicara el almacenador. Si $i = 0,1,2,3$ y $j = 0,1,2$, los estados del sistema se pueden representar de la siguiente manera: (Ver Figura 3.5)

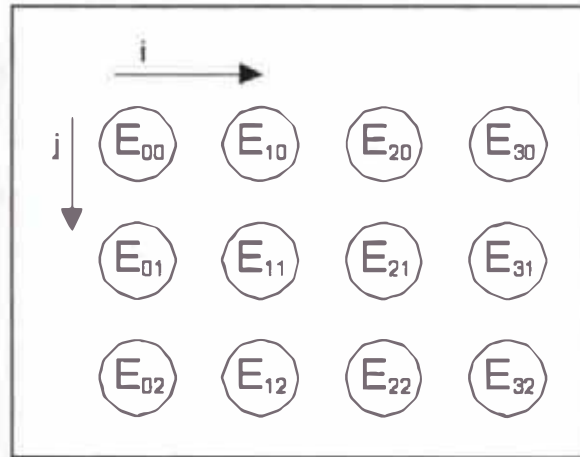


Figura 3.5: Estados posibles para $i = 0,1,2,3$ y $j = 0,1,2$

Dado un conjunto particular de estados donde: P_k y T_{kl} P_k denotan la probabilidad de estar en un estado E_k en un determinado instante t , T_{kl} denota la probabilidad de pasar de un estado E_k a un estado E_l .

Se consideraran solo transición de estados de E_n a E_{n+1} o de E_n a E_{n-1} . Esto se debe a que se asume que en el período de tiempo Δt en que pueden ocurrir llegadas o salidas, es lo suficientemente pequeño. (Ver Figura 3.6)

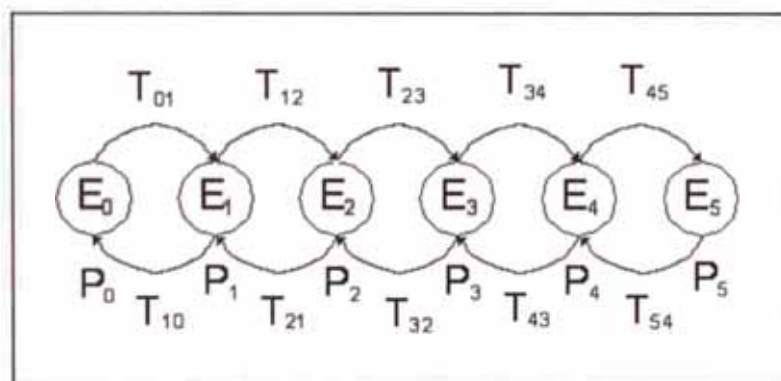


Figura 3.6: Diagrama de estado con probabilidad de estado (P_k) y de transición (T_{kl})

Las llegadas o salidas simultáneas son llamadas llegadas o salidas en masa. Por simplicidad matemática, se asume que el periodo de tiempo Δt en que puede ocurrir llegadas o salidas, se ha definido lo suficientemente

pequeño como para que solo pueda ocurrir una llegada o salida. Finalmente, los diagramas de estado que representan las probabilidades de transición como arcos, son referidos como modelos Markovianos.

1. Modelos Markovianos

Los modelos Markovianos son útiles en la representación de cambios de estado en un sistema, basado en un conjunto de probabilidades de transición. A continuación se muestra las maneras en que se puede llegar a un estado E_n dentro de un intervalo Δt :

- ✓ El sistema está en E_n en el instante t y no se producen llegadas ni salidas durante Δt
- ✓ El sistema está en E_n en el instante t y se produce una llegada y una salida durante Δt
- ✓ El sistema está en E_{n+1} en el instante t y se produce una salida durante Δt
- ✓ El sistema está en E_{n-1} en el instante t y se produce una llegada durante Δt

Las probabilidades de transición correspondientes a los enunciados anteriores son las siguientes:

$$T_{nn} = P(\text{no llegada}) \times P(\text{no servicio}) + P(\text{una llegada}) \times P(\text{un servicio})$$

$$T_{n+1,n} = P(\text{no llegada}) \times P(\text{un servicio})$$

$$T_{n-1,n} = P(\text{una llegada}) \times P(\text{no servicio})$$

Cabe mencionar que la primera probabilidad representa los dos primeros enunciados. Se asume que ambos sucesos son estadísticamente independientes. Luego de haber definido las ecuaciones anteriores, se puede decir que la probabilidad de estar en el estado E_n en el instante $t + \Delta t$ está dada por:

$$P_n(t + \Delta t) = P_n \times T_{nn} + P_{n+1} \times T_{n+1,n} + P_{n-1} \times T_{n-1,n}$$

2. Distribución exponencial de las llegadas y los servicios

Normalmente, se asume que los tiempos entre las llegadas y tiempos de servicio se distribuyen exponencialmente y que las llegadas de las unidades al sistema pueden ser modeladas a través de un proceso de Poisson.

Aplicando estos conceptos al modelo de líneas de espera, se tiene que para un intervalo Δt :

$$P(\text{no llegadas en } \Delta t) = e^{-\beta \Delta t}$$

Donde β es la tasa promedio de llegadas de unidades al sistema. Esta expresión expandida en una serie de Taylor y Simplificada suponiendo un Δt muy pequeño, queda de la siguiente manera:

$$P(\text{no llegadas en } \Delta t) = 1 - \beta \Delta t$$

Y la probabilidad de una llegada es:

$$P(\text{una llegada en } \Delta t) = \beta \Delta t$$

Donde: $1/\beta =$ esperanza matemática del tiempo entre llegadas

Se sigue el mismo procedimiento para servicio:

$$P(\text{no servicio en } \Delta t) = 1 - \mu \Delta t$$

$$P(\text{un servicio en } \Delta t) = \mu \Delta t$$

3. Modelos de líneas de espera de población finita

Este tipo de modelo es de gran interés en la construcción, dado que en muchas situaciones un número finito de recursos son servidos por uno o más servidores en un modo cíclico. Este tipo de modelos también pueden ser representados por los modelos gráficos Markovianos.

En este sistema, la probabilidad de llegada es proporcional al número de unidades que son externas al sistema.

A continuación se muestra un sistema compuesto por 6 unidades y un servidor: (Ver Figura 3.7)

La probabilidad de llegada de las unidades entrando al sistema está dada por:

$$(M - i) \times \beta$$

Donde:

M : Número de unidades de la población finita

i : Número de unidades dentro del sistema

$$\beta = 1 / T_{pr}$$

T_{pr} : Es el tiempo promedio que permanece una unidad fuera del sistema.

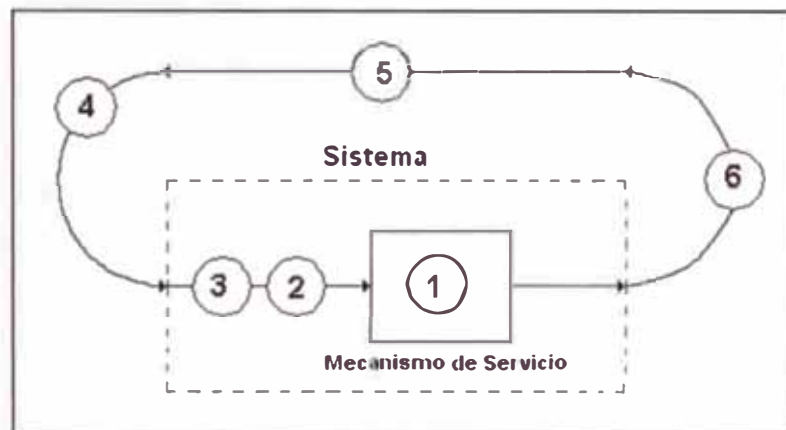


Figura 3.7: Sistema finito de seis unidades y un servidor.

El modelo Markoviano que representa este sistema es: (Ver Figura 3.8)

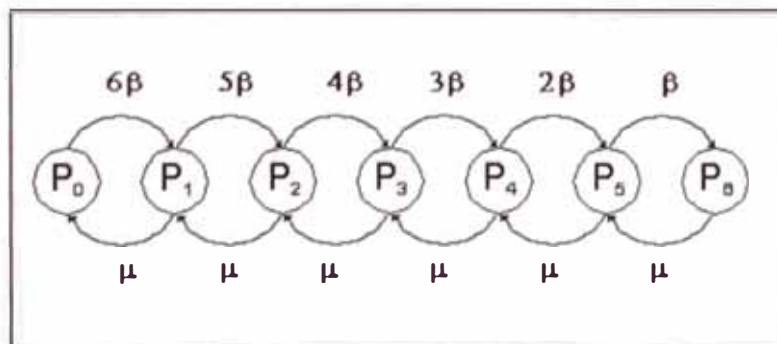


Figura 3.8: Modelo Markoviano para $M = 6$ unidades

Las probabilidades de estado, ha sido asociada con cada estado y los arcos representan las probabilidades de transición entre los estados. Utilizando los flujos de ingresos y egreso a cada estado, es posible determinar las siguientes ecuaciones de estado para el sistema:

Nodo	Ingreso	=	Egreso
0		=	$6\beta P_0$
1	$6\beta P_0 + \mu P_2$	=	$5\beta P_1 + \mu P_1$
2	$5\beta P_1 + \mu P_3$	=	$4\beta P_2 + \mu P_2$
3	$4\beta P_2 + \mu P_4$	=	$3\beta P_3 + \mu P_3$
4	$3\beta P_3 + \mu P_5$	=	$2\beta P_4 + \mu P_4$
5	$2\beta P_4 + \mu P_6$	=	$\beta P_5 + \mu P_5$
6	βP_5	=	$+ \mu P_6$

La productividad de un modelo de líneas de espera finito se puede determinar calculando la probabilidad de que no haya unidades en el sistema (P_0). La probabilidad de que hayan unidades en el sistema es $(1 - P_0)$, lo cual indica el porcentaje de tiempo esperado de ocupación del sistema.

La producción del sistema se define como:

$$\text{Prod} = L (1 - P_0) \mu U C = L (P. I.) \mu C$$

Donde:

- μ : Tasa de servicio (Ejm: cargas por hora)
- C : Capacidad de la unidad cargada en unidades físicas (Ejm: m³, Ton)
- L : Período de tiempo considerado
- $P. I.$: Índice de productividad (porcentaje del tiempo en que el sistema está ocupado)

Para poder calcular P_0 se debe resolver a partir del sistema de ecuaciones de estado y la siguiente ecuación:

$$\sum P_i = 1.0$$

Con el cálculo de P_0 se obtiene la producción. La solución general para un sistema finito de M unidades con distribución exponencial de los servicios y las llegas es:

$$P_0 = (\sum (M! \times (\beta/\mu)^i) / ((M - i)!))^{-1}$$

$$P_i = (M! \times (\beta/\mu)^i \times P_0) / (M - i)!$$

Con las M unidades de igual capacidad. El número medio de unidades en el sistema está dado por:

$$N = \sum P_i \times X_i = M - (\mu \times (1-P_0) / \beta)$$

Donde:

P_i : Probabilidad del estado i

X_i : Número de unidades en el estado asociado con P_i

Por otro lado, el largo promedio de la cola de unidades que están en espera, está dado por la siguiente expresión:

$$Q = \sum P_i \times (X_i - 1) = M - ((\beta + \mu) \times (1-P_0) / \beta)$$

4. Modelos de población finita con multiservicio

Cuando se presente más de una unidad de servicio, el modelo Markoviano se modifica un poco en relación con las probabilidades de tránsito asociadas a los servicios. Por ejemplo, si se tiene cinco unidades y tres servidores con diferentes tasas (μ_1, μ_2, μ_3) se obtiene el siguiente modelo: (Ver Figura 3.9)

La producción varía y se obtiene la siguiente ecuación:

$$\text{Prod} = L [\mu_1 P_1 + (\mu_1 + \mu_2) P_2 + (\mu_1 + \mu_2 + \mu_3) \times (P_3 + P_4 + P_5 + P_6)] C$$

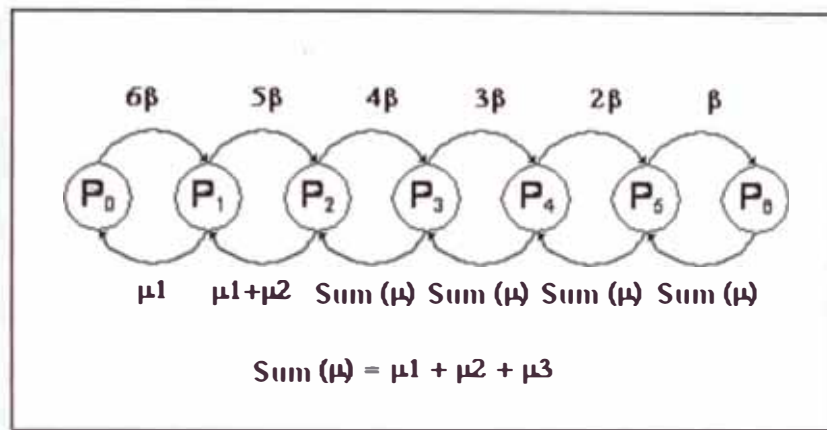


Figura 3.9: Modelo finito con 3 servidores, con tasas de servicio diferentes

5. Modelo económico de las líneas de espera

Un Sistema de cola puede dividirse en sus dos componentes de mayor importancia, la cola y la instalación de servicio. Ambas componentes del sistema tienen costos asociados que deben de considerarse.

Costo de espera: Espera significa desperdicio de algún recurso activó que bien se puede aprovechar en otra cosa y está dado por:

Costo de servicio: Se trata de comprar varias instalaciones de servicio.

Costo total: Aquí hay que tomar en cuenta que para tasas bajas de servicio, se experimentan largas colas y costos de espera muy altos. Conforme aumenta el servicio, disminuyen los costos de espera, pero aumenta el costo de servicio y el costo total disminuye, sin embargo, finalmente, se llega a un punto de disminución en el rendimiento. Entonces el propósito es encontrar el balance adecuado para que el costo total sea el mínimo.

La siguiente ilustración muestra el comportamiento de los costos de servicio y espera en función al nivel de servicio. (Ver Figura 3.10)

El costo total del período está dado por la siguiente ecuación:

$$C_t = C_e L + C_s k$$

Donde:

C_e : Costo de espera de una unidad por período

L : Número esperado de unidades en el sistema en función de k

C_s : Costo de servicio por período

K : Número de servidores

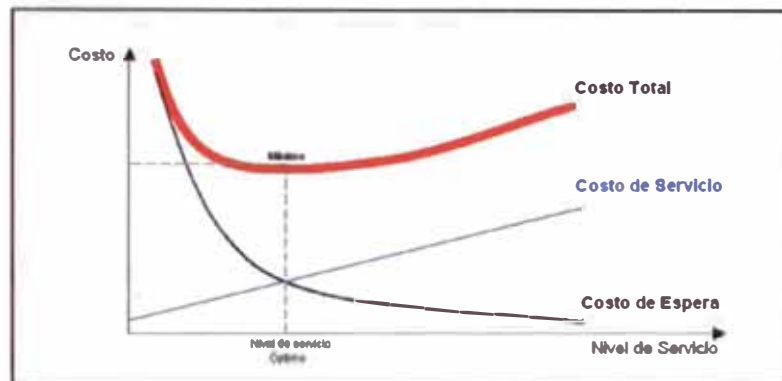


Figura 3.10: Solución conceptual de costos de un modelo de espera

Para poder optimizar el costo total se debe tener en cuenta la composición de los costos involucrados en los costos de espera y servicio.

Modelos de Transporte y Asignación:

Hay dos clases especiales de programación lineal a los que se hace referencia frecuentemente con el nombre de modelos de distribución. Estos son los modelos de transporte y asignación.

1. El problema de Transporte:

Este es un caso particular de la programación lineal y consiste en distribuir un producto o recurso desde varios orígenes a varios destinos o usuarios, en tal forma que la colocación sea óptima. Un problema de transporte puede definirse completamente por la matriz que se indica a continuación.

Destinos					
Origen	1	2	.....	n	Oferta
1	C_{11}	C_{12}	.....	C_{1n}	O_1
2	C_{21}	C_{22}	.....	C_{2n}	O_2
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
m	C_{m1}	C_{m2}	.....	C_{mn}	O_m
Demanda	D_1	D_2	.....	D_n	

Donde:

C_{ij} : Costo de transportar una unidad de producto o recurso desde el origen i hasta el destino j .

Matemáticamente el problema se define como sigue:

$$F(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} \cdot X_{ij}$$

X_{ij} : Cantidad de unidades asignadas desde el origen i hasta el destino j .

Sujeta de restricciones:

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = O_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} = D_j \quad j = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^m O_i = \sum_{j=1}^n D_j$$

y $X_{ij} \geq 0$ para todos los pares ij

La última ecuación indica que la suma de los valores O_i y D_j deben ser

iguales. Esta restricción no impone limitaciones serias al problema, ya que en caso de no cumplirse, bastara introducir un origen o un destino ficticio para satisfacerla.

2. El problema de Asignación:

Este modelo está relacionado con la asignación de un determinado número de orígenes al mismo número de destinos con el objeto de optimizar alguna función de efectividad. Matemáticamente, el modelo de asignación se define como la optimización de la función:

$$F(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} \cdot X_{ij}$$

Donde:

C_{ij} : Son los coeficientes de costo (ganancia)

Sujeta de restricciones:

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1 \quad i = 1,2,3,\dots,n$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} = 1 \quad j = 1,2,3,\dots,m$$

$X_{ij} = 0$ o 1 para todos los X_{ij}

3.3. CONCEPTO DE CYCLONE

3.3.1. Elementos de una Red de Trabajo para el Modelamiento de Procesos

La Red de operaciones Cíclicas CYCLONE (Cyclic Operations Networks) CYCLONE es una técnica modeladora que permite la representación gráfica y la simulación de sistemas discretos con variables determinísticas o estocásticas.³

³ Daniel W. Halpin; Planning and analysis of construction operations, Pág. 99-106

CYCLONE está basado en tres estados temporales básicos en que se puede encontrar cualquier recurso: estado activo o de procesamiento, estado pasivo o de espera, y transición entre estados. La representación de estos estados otorga un formato gráfico para la construcción del modelo, el cual se transcribe a un lenguaje computacional en el proceso de simulación.⁴

Elemento Normal

Un modelo gráfico de una actividad de trabajo NORMAL debería tener los siguientes componentes:

1. Un único formato gráfico (nodo rectangular)
2. Una etiqueta descriptiva de la tarea de trabajo.
3. Una función de consumo de tiempo definido por el usuario.
4. Una indicación de las entidades del recurso que deben transitar por la tarea de trabajo.

Una Actividad Normal es un elemento que representa una tarea de trabajo que comienza siempre y cuando la tarea precedente finaliza. En este elemento, las unidades que llegan comienzan a ser procesadas inmediatamente y por lo tanto, no son retrasadas. Esta actividad es representada mediante un rectángulo. (ver Figura 3.11)

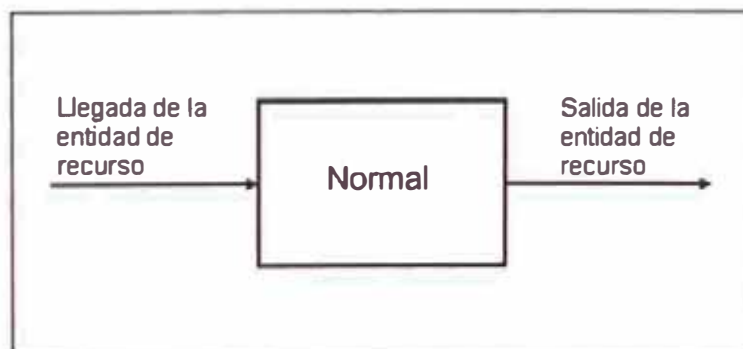


Figura 3.11: Elemento Normal

Actividad Combi

Una actividad Combi, es un elemento que representa una tarea de trabajo que puede comenzar siempre que los recursos necesarios para realizar esta

⁴ Alfredo Serpell Bley; Administración de Operaciones de Construcción, Pág. 150

actividad están disponibles en todos los nodos de cola que lo preceden. Es decir, si las unidades están disponibles, estas son combinadas y procesadas con la actividad. Si las unidades están disponibles en uno pero no en todos los nodos de cola precedentes, estas son retrasadas hasta que se cuenta con todos los recursos simultáneamente.

La actividad Combi es representada mediante un rectángulo biselado en el vértice superior izquierdo. (Ver Figura 3.12)

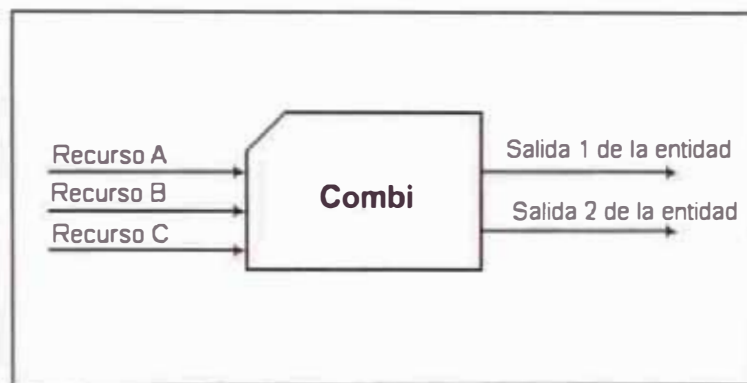


Figura 3.12: Elemento Combi

Nodo de Cola

El estado de ocio o pasivo de un recurso es modelado por un círculo con una línea oblicua para denotar a un Nodo de Cola o QUEUE (Q).

El tiempo que un recurso este en estado de ocio depende por lo general de las condiciones externas de la operación de construcción relacionada a los varios estados de las tareas de trabajo, a sus duraciones y al eficiente diseño y manejo de las operaciones. (Ver Figura 3.13)

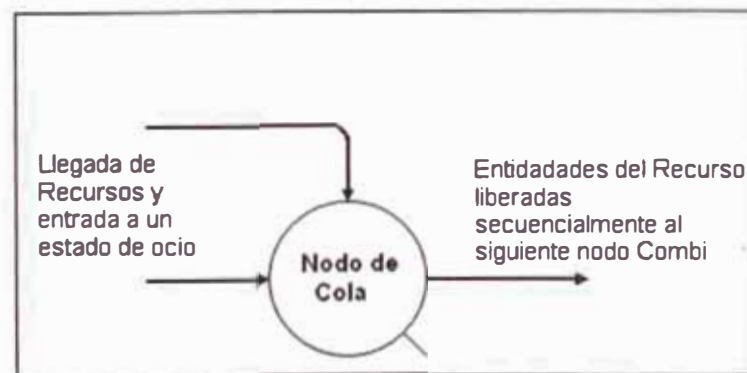


Figura 3.13: Nodo de Cola

Este elemento precede a todas las actividades Combi, básicamente los Nodos de cola representan a los recursos, tales como materiales cuadrillas o materiales, que van a ser utilizados para realizar una tarea de trabajo. Además, es en este elemento donde las estadísticas de retraso son medidas.

Flecha o Arco

Para modelar la dirección del flujo de una entidad de recurso entre varios estados activos, ya sea Normal o Combi, y los estados pasivos, Nodos de Cola, son empleados las flechas o arcos. El arco no tiene propiedades de retraso y simplemente modela la dirección del flujo de la entidad. El tiempo de tránsito de la entidad, una vez iniciada, es instantánea

Para modelar la dirección del flujo de una entidad de recurso entre varios estados activos, ya sea Normal o Combi, y los estados pasivos, Nodos de Cola, son empleados las flechas o arcos.

El arco no tiene propiedades de retraso y simplemente modela la dirección del flujo de la entidad. El tiempo de tránsito de la entidad, una vez iniciada, es instantánea. (Ver Figura 3.14)

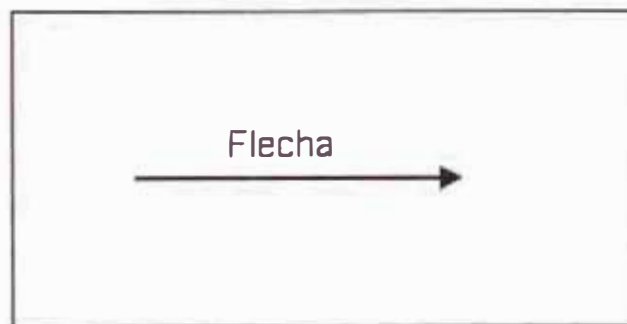


Figura 3.14: Flecha o Arco

Counter

El Counter es un nodo de función especial. Este elemento también llamado acumulador. El propósito del Counter es contar el número de veces que una unidad clave pasa un punto de control particular en el modelo de la red, de esta forma, la producción puede ser medida.

El elemento Counter puede también emplearse para controlar el número de repeticiones de los ciclos del sistema antes de que se detenga o finalice. De esta manera, la duración del experimento se puede controlar asignando un número de ciclos al Counter. Una vez que se realiza el número de unidades a alcanzar por el elemento Counter, el experimento de la simulación es terminado.

3.3.2. Diagrama del ciclo de actividad y escaneo de actividades

Los modelos de Escaneo de Actividad son preparados sobre la base de las diversas actividades que pueden tomar lugar en una operación. El modelador se centra en la identificación actividades, las condiciones bajo las cuales puede suceder, y los resultados de las actividades cuando ellas finalizan.

Esos modelos son típicamente representados usando Diagramas de Actividad Cíclica (ACDs), los cuales son redes de trabajo de círculos y rectángulos que representan recursos en espera, actividades y sus precedencias. El ACD (ver Figura 3.15) por ejemplo, es una representación gráfica de la información en la Tabla 3.1

Tabla 3.1: Actividades, condiciones y salidas de una operación de movimiento de tierra.		
Condiciones necesarias para iniciar la actividad	Actividad	Salidas de la actividad
Volquete en espera para ser cargado Vagón lleno listo para ser vaciado	Vaciado de material de vagón lleno	Volquete en espera para ser cargado Material en el volquete Vagón de 2.7 m ³
Volquete cargado listo para transportar Material en el volquete	Traslado de material	Volquete en espera para ser cargado

Los rectángulos representan actividades (recursos colaborando para lograr una tarea), los círculos representan colas (recursos en espera), y los conectores entre ellos representan el flujo de recursos. Diagramas de actividad de este tipo son usados para expresar el concepto principal del modelo de simulación. Otros detalles del modelo tal como condiciones de inicio no relacionadas a la disponibilidad del recurso, no se muestran. El ACD es usado como una guía para

codificar el modelo usando un lenguaje programador de simulación o de propósito general.

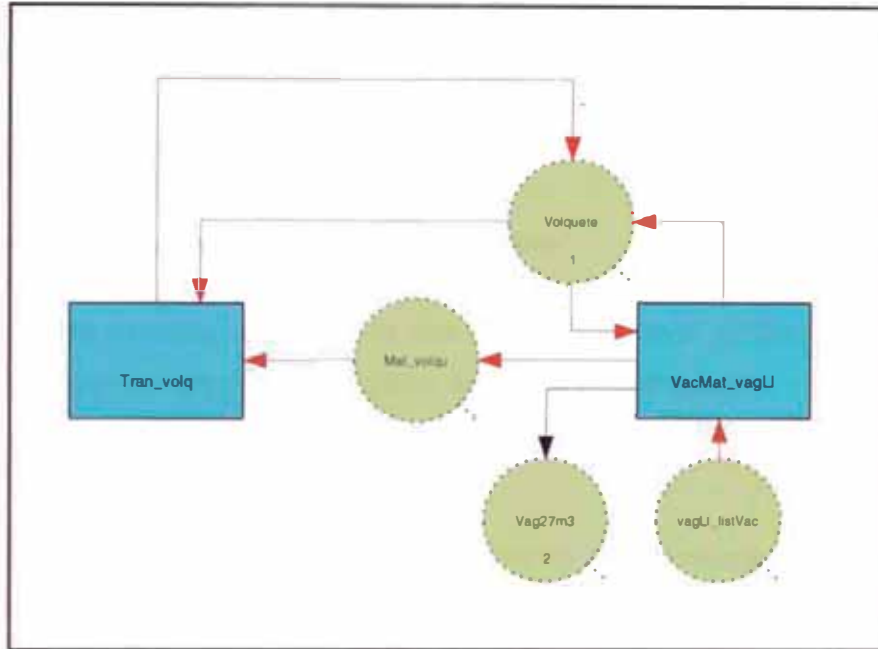


Figura 3.15: ACD para un movimiento de tierra típico.

3.4. SOFTWARE EZSTROBE

EZStrobe es un muy simple pero poderoso sistema de simulación de propósito general, diseñado para el modelamiento de operaciones de construcción, pero de dominio independiente y por consiguiente útil para el modelamiento de una amplia variedad de sistemas en cualquier disciplina. EZStrobe está basado en los diagramas de actividad cíclica y emplea las tres fases del paradigma del Escaneo de actividad. Esto es por consiguiente adaptable a sistemas complejos donde muchos recursos colaboran para llevar a cabo una tarea como es típico en la construcción.

Varios sistemas de simulación han sido diseñados específicamente para la construcción (ej. Halpin y Riggs 1992, Martínez 1996). Esos sistemas usan algunos tipos de red de trabajo basados en los Diagramas de Actividad Cíclica para representar la esencia del modelo, y emplean un reloj de avance y un mecanismo de generación de eventos basado en el Escaneo de Actividades, o el Escaneo de Actividades de tres fases. Estos sistemas son diseñados tanto para modeladores de tareas simples (ej. CYCLONE) o muy avanzados (ej.

STROBOSCOPE), pero no satisfacen la necesidad de una herramienta simple y fácil de aprender capaz de modelar problemas moderadamente complejos con poco esfuerzo. EZStrobe está diseñado para llenar ese vacío de las actuales herramientas de simulación y facilitar la transición a herramientas más avanzadas (ej. STROBOSCOPE).

3.4.1. Modelo de simulación

Elementos modeladores básicos del Ezstrobe

Los elementos modeladores básicos que se emplean en el EZStrobe, las reglas de precedencia que los gobiernan están descritas a continuación:

Nodo de Cola (QUEUE)

Un Nodo de Cola QUEUE es un elemento que sostiene los recursos en ocio. El nombre del Nodo de Cola es mostrado al centro del gráfico. Al comienzo de la simulación los Nodos de cola sostienen un número específico de recursos. Este número es mostrado debajo del nombre del Nodo de Cola.

Los recursos son posicionados en los Nodos de cola cuando ellos son liberados por las instancias terminantes de las actividades precedentes y son removidos de los Nodos de Cola por el inicio de las instancias de las actividades sucesoras (Actividades Condicionales Combi).

Actividad condicional (Combi)

Una Actividad Condicional Combi es un elemento que representa tareas de trabajo que pueden empezar siempre y cuando los recursos que están disponibles en los nodos de cola que lo preceden son los suficientes para soportar la tarea. El nombre de la actividad condicional es mostrado al centro del elemento. El número en la parte superior es la prioridad que el elemento condicional tiene sobre los otros elementos COMBI cuando compiten por los recursos en los Nodos de Cola precedentes.

Un elemento Combi con una prioridad alta tiene la posibilidad de comenzar antes que las actividades condicionales de menor prioridad. Las

prioridades pueden ser negativas y el valor por defecto es cero (por ejemplo, cuando la prioridad no es especificada es asumida como cero). La fórmula en la parte inferior del elemento Combi es usada para determinar la duración de las instancias, la cual es típicamente obtenida de una distribución de probabilidad. Por lo tanto, diferentes instancias de una Actividad Condicional pueden tener diferentes duraciones.

Las Actividades Condicionales pueden ser seguidas por Nodos de Cola, pero pueden preceder a cualquier nodo, excepto a Actividades Condicionales.

Actividad vinculada (Normal)

Una Actividad Vinculada Normal es un elemento que representa las tareas de trabajo que comienzan cuando una instancia de alguna actividad precedente finaliza. El nombre de la Actividad Vinculada es mostrado en el centro. La fórmula en la parte inferior del elemento Normal es usada para determinar la duración de sus instancias la cual es típicamente obtenida de una distribución de probabilidades. Consecuentemente, diferentes instancias de la misma actividad pueden tener diferentes duraciones.

Una Actividad Vinculada Normal puede seguir a cualquier otro nodo excepto a un Nodo de Cola y puede preceder a cualquier otro nodo excepto a una Actividad Condicional Combi.

FORK – Bifurcado

Un Fork es un elemento de probabilidad de ruta. Este típicamente sigue a una actividad pero puede también seguir a otro Fork.

Si el sucesor escogido es un elemento Normal entonces el elemento Normal empieza. Pero si el sucesor escogido es un Nodo de Cola entonces este nodo recibe cualquier recurso dirigido a través del Fork. Si el elemento escogido es un segundo Fork este escogerá uno de sus sucesores.

Draw Link

Un Draw Link conecta un Nodo de Cola con una Actividad Condicional y muestra dos piezas de información separadas por una coma.

La primera parte es la condición necesaria para que la Actividad Condicional sucesora empiece como una función del contenido del Nodo de cola predecesor. El texto ">0", por ejemplo indica que el contenido del Nodo de Cola debe ser mayor que cero para que la Actividad Condicional empiece.

El EZStrobe admite seis operadores para expresar las siguientes relaciones: menor que (<), menor o igual que (<=), mayor que (>), mayor o igual que (>=), igual (==) y no igual (≠).

La segunda parte es la cantidad del recurso que la actividad condicional intentara remover del Nodo de Cola predecesor en el caso que la actividad condicional empiece.

Diagrama de Actividad Cíclicas Ezstrobe

El Diagrama de Actividad Cíclica de EZStrobe es una extensión del Diagrama de Actividad Cíclica estándar descrito anteriormente. El ACD del EZstrobe para el mismo proceso de eliminación de material en el volquete descrito en la Tabla 3.1 (Ver Figura 3.15 y 3.16)

A diferencia del ACD (Ver Figura 3.15), las anotaciones del ACD del EZStrobe (Ver Figura 3.16) hacen una completa e inambigua representación de la operación. Por ejemplo el "1" escrito en la parte inferior del Nodo de cola "Volquete" indica que al comienzo de la operación el Nodo de cola contiene 01 unidades de recurso (volquete).

Por otro lado, la primera parte de la anotación mostrada en el enlace que conecta "Material en el volquete" a "Transporte del material en el volquete" (" ≥ 12 ") indica que una de las condiciones necesarias para empezar el "Transporte del material en el volquete" es que más de 12 unidades de recurso existan en "Material en el volquete".

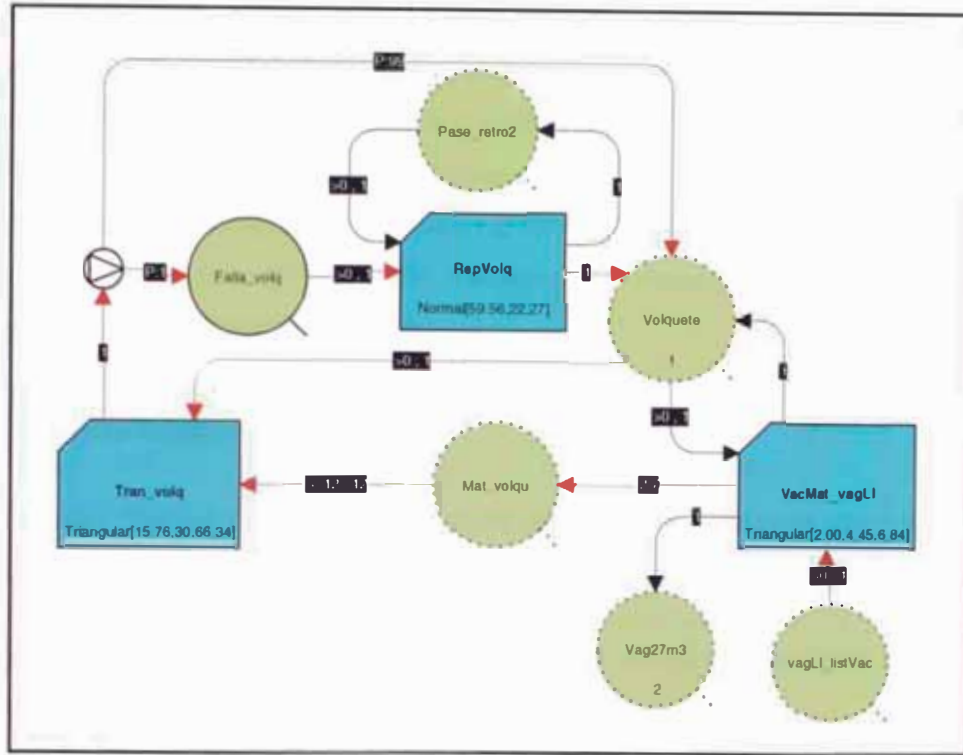


Figura 3.16: ACD EZStrobe para un movimiento de tierra típico.

La otra condición necesaria para el “Transporte del material en el volquete” es que al menos 01 unidades de recurso exista en “Volquete”. La anotación “Triangular [15.76, 30.00, 66.34]” mostrada dentro del elemento COMBI “Transporte del material en el volquete” indica que su duración es una muestra de una distribución Triangular con un mínimo de 15.76, moda de 30.00 y un máximo de 66.34 (minutos). El “2.7”, mostrado sobre el conector que conecta “Vaciado de material de vagón lleno” a “Material en el volquete”, indica que una de las salidas del “Vaciado de material de vagón lleno” es la inserción de 2.7 unidades de recurso en “Material en el volquete”.

El Fork que se observa saliendo de “Transporte de material en el volquete”, es una bondad que ofrece el EZStrobe y que permite colocar un porcentaje de probabilidad de ocurrencia a la siguiente actividad o nodo de cola según sea el caso. En este caso se interpreta como que existe un 99% de probabilidad que terminado el “Transporte de material en el volquete”, se inserte 01 unidades de recurso a “Volquete” y solo 1% de probabilidad que ocurra una falla en el volquete que origine la “Reparación del volquete”.

En los modelos de EZStrobe, todas las condiciones para inicio y salida de las actividades están en términos de cantidad de recursos. Los recursos que residen en el mismo lugar, se asume que son indistinguibles, intercambiables y existen en grandes cantidades (su cantidad puede ser expresada con números reales y no son limitados a enteros). EZStrobe no toma en cuenta el tipo de recursos, ni las unidades con la cual ellos son medidos. El modelador es responsable de mantener la consistencia del modelo.

3.4.2. Estructurando el modelo

La sucesión relativa y lógica de las tareas de trabajo y procesos que forman una operación de construcción, constituyen la estructura tecnológica de la operación.

El procedimiento para estructurar un proceso de construcción dado consiste en cuatro pasos básicos.

1. La Identificación de Unidad de Flujo: Como primer paso el modelador debe identificar los recursos (unidades de flujo) del sistema que son relevantes para el comportamiento del sistema y para los cuales la información del tiempo de transito del recurso esta disponible o es obtenible de campo.

La selección de las entidades de flujo es muy importante, porque establece el grado de detalle del modelo. Una selección apropiada de las unidades de flujo requiere un conocimiento íntimo de las operaciones de construcción para establecer las bases de un modelo valido.

Normalmente, las unidades seleccionadas son ítems físicos tal como unidades de producción (ej. cargador frontal, camiones), o recursos tal como materiales, dinero y espacio. Otras unidades de flujo son informativas e indican que ciertas condiciones han sido realizadas permitiendo el inicio de una actividad.

2. Desarrollo de Ciclos de Unidad de Flujo: El siguiente paso en la formulación del modelo es la identificación de todo un rango de posibles estados que pueden ser asociados con cada unidad de flujo y desarrollar el ciclo a través del cual cada unidad de flujo pasa.

3. **Integración de ciclos de Unidad de Flujo:** Los ciclos de unidad de flujo proveen los componentes elementales para la construcción del modelo. La estructura y el alcance del modelo se obtienen de a integración y síntesis de los ciclos de la unidad de flujo.

4. **Inicialización de la unidad de Flujo:** Para analizar el modelo y determinar la respuesta del modelo del sistema, las diferentes unidades de flujo del sistema deben ser inicializadas, tanto en el número como en la situación inicial.

3.4.3. Diseño de la Red Operacional Cíclica del Modelo en EZStrobe

La red operacional cíclica del modelo "Instalación de Tuberías" se subdivide en tres grupos: Montaje (I, II, III), Producción (I, II, III), Desmontaje (I, II).

Montaje comprende el montaje de los Rieles principales y Shield hasta el hincado del primer tubo (llenado de vagón de 1m^3) y montaje de la Faja secundaria (01 Tubos)

Producción, abarca todo el proceso de excavación (llenado de vagón de 2.7m^3) para el hincado de tubería horizontal y el montaje e instalación de 02 estaciones intermedias colocadas en posiciones estrategicas dentro de la columna de tubos, para disminuir las presiones de la estación principal. (68 Tubos)

Desmontaje se inicia con la llegada de la máquina al Pozo de Salida, y el hincado de 02 tubos para su salida total y posterior izado y traslado. Incluye también el desmontaje y cierre de las 02 estaciones intermedias y desmontaje y traslado de las mangueras de bentonita usadas para la lubricación y de los rieles usados para el transporte del vagón dentro de la columna de tubos q forma el túnel.

Los detalles del Montaje, Producción y Desmontaje se encuentra en el Anexo "A"

3.4.4. Parámetros y Salidas del modelo

Los resultados de un sistema dado dependen de los valores de decisión de las variables claves (por ejemplo, el número de equipos a usar) u otros datos (por ejemplo, el costo horario de los equipos usados). Estos valores son frecuentemente usados en diferentes partes del modelo y sus definiciones deben ser colocadas en espacios simples que faciliten su experimentación.

Los parámetros del EZstrobe permiten al diseñador del modelo asignar nombres simbólicos y descripciones a estos valores. El nombre de un parámetro puede entonces ser usado durante todo el modelado.

Usando parámetros es posible crear modelos genéricos que se adaptan a un amplio rango de operaciones similares. Tales modelos pueden ser rehusados especificando los valores de los parámetros apropiados.⁵

Las decisiones típicas de un sistema dependen con frecuencia de las medidas de comportamiento que deben ser calculadas sobre la base de los resultados estadísticos. En el caso del tendido de tuberías, la medida más importante del comportamiento sea probablemente el costo por metro lineal de tubería instalada. Otras importantes medidas del comportamiento pueden incluir el índice de producción, tiempo total de ejecución.

Los resultados de EZStrobe permiten la definición de medidas de comportamiento con formulas que dependen de parámetros, estadísticas de la ejecución del modelo (variables tanto globales como de instancia) y otros resultados.

EZStrobe permite el uso de nombres simbólicos para representar números o expresiones en otras expresiones, a lo que llama variables. Las variables del EZStrobe no son sitios de almacén de información, son más como funciones que no tienen argumentos o como formulas en hojas de cálculo del programa.⁶

Algunas variables son definidas y mantenidas por el sistema y están siempre disponibles para su uso en expresiones. Otras variables son de uso definido

⁵ Julio C. Martinez; EZStrobe – General Purpose Simulation System Based on Activity Cycle Diagrams, Pág. 7

⁶ Julio C. Martinez; STROBOSCOPE - Status and resource based simulation of construction process, Pág. 67.

para cada modelo con el propósito de localizar los parámetros del problema y simplificar expresiones.

Variables Globales

Las variables globales acceden a información acerca del proceso de modelado en conjunto así como información relacionada al modelamiento de elementos particulares.

Las variables globales que acceden a un aspecto del proceso modelado que no este relacionado al modelamiento particular de elementos consiste en solo el nombre de la variable. La variable más comúnmente usada de este tipo es "SimTime", la cual retorna el último valor del reloj de simulación.

Siempre que SimTime sea usado en una expresión, EZStrobe lo sustituirá por el valor del reloj de simulación al momento de evaluar la expresión.⁷

La mayoría de variables globales acceden a información relacionada a uno o más elementos modelados, es decir, no a un elemento modelado en particular (menos explicitas). EZStrobe crea nombres para esas variables, usando los nombres de los elementos modelados involucrados y el nombre de las variables, separados por un punto.

Variables globales (accesibles todo el tiempo)

Variables	Descripción
Sim Time	El valor actual del reloj de simulación
<i>Actividad AveDur</i>	El valor de duración promedio de las instancias de la actividad
<i>Actividad AvelInter</i>	Es el valor de duración promedio del nuevo inicio de una instancia de actividad
<i>Actividad Curlnst</i>	El valor actual de instancias de la actividad.
<i>Actividad. InContext</i>	Retorna 1 si una instancia de la actividad esta siendo creada o terminada y de otro modo 0.

⁷ Julio C. Martinez; STROBOSCOPE - Status and resource based simulation of construction process, Pág. 67.

<i>Actividad. FirstStart</i>	El tiempo en el cual la primera instancia de la actividad empezó.
<i>Actividad. LastStart</i>	El tiempo en el cual la última instancia de la actividad empezó.
<i>Actividad. MaxDur</i>	El máximo valor de las duraciones de las instancias de la actividad.
<i>Actividad. MaxInter</i>	Es el valor de duración máximo del nuevo inicio de una instancia de actividad
<i>Actividad. MinDur</i>	El mínimo valor de las duraciones de las instancias de la actividad.
<i>Actividad. MinInter</i>	Es el valor de duración mínimo del nuevo inicio de una instancia de actividad
<i>Actividad. SDDur</i>	La desviación estándar de las duraciones de las instancias de la actividad.
<i>Actividad. SDInter</i>	Es el valor de desviación promedio del nuevo inicio de una instancia de actividad
<i>Actividad. TotInst</i>	El número total de instancias de la actividad que han sido creadas.
<i>Nodo de cola. AveCount</i>	Promedio en porcentaje de todos los tiempos en que el recurso se encuentra en estado disponible por cada ciclo de trabajo con respecto al tiempo total del ciclo.
<i>Nodo de cola. AveWait</i>	El tiempo promedio de espera de los recursos que han entrado al Nodo de cola.
<i>Nodo de cola. CurCount</i>	El contenido actual del Nodo de cola
<i>Nodo de cola. MaxCount</i>	El contenido máximo experimentado por el Nodo de cola.
<i>Nodo de cola. MinCount</i>	El contenido mínimo experimentado por el Nodo de cola.
<i>Nodo de cola. SDCount</i>	La desviación estándar del contenido experimentado por un Nodo de cola
<i>Nodo de cola. TotCount</i>	La cantidad total de recurso que ha entrado a un Nodo de cola

Variables de Instancia

Además de las variables globales EZStrobe crea y mantiene variables de instancia, las cuales están relacionadas a casos específicos de elementos modelados específicos. EZStrobe provee acceso a la información de los casos solo cuando el elemento modelado esta en contexto. Una actividad esta en contexto cuando uno de sus casos esta siendo creado o terminado.

Tabla 3.3: Variables de Instancia	
Variable	Descripción
<i>Actividad. Duration</i>	La duración de la instancia de la actividad que está empezando o terminando
<i>Actividad. Instance</i>	El número de casos de la instancia que está comenzando o terminando.

3.4.5. Ciclo de simulación

Durante el ciclo de simulación EZStrobe cuenta con algunas características avanzadas que permiten parametrizar las entradas, medir las salidas, definir el comportamiento del modelo dependiente de la dinámica del estado del modelo, construir modelos multipágina, publicar modelos a ser ejecutados en red, y animar modelos ejecutados para su verificación (perfeccionamiento).

Aunque el Diagrama de Actividad Cíclica de EZStrobe es una representación completa de una operación, en muchos casos las entradas básicas requeridas no son suficientes para correr la simulación. Para simulaciones que no hacen una parada natural (ej. que pueda potencialmente correr para siempre) es necesario especificar una condición de finalización de la simulación. En EZStrobe esa condición puede ser especificada fijando un límite en el tiempo de simulación o en el número de veces que una actividad en particular se inicia.

El primer modelo de un sistema complejo es raramente una representación correcta de lo que los modeladores entienden como un sistema real. Corriendo el modelo y analizando sus resultados es muy posible detectar algunos errores pero otros errores pueden no ser tan evidentes y llegar a no ser detectados.

EZStrobe ofrece una gráfica e interactiva verificación del modelo por medio de la animación.

El animador gráficamente ilustra el estado dinámico de la simulación (ej. el contenido actual de un Nodo de cola) y los eventos que toman lugar durante su ejecución (ej. las instancias de actividad que comienzan o terminan, cuando un nodo de cola recibe un recurso o cuando los recursos fluyen a través de los conectores).

El borde rojo de una instancia indica que está terminando y el borde azul indica que está empezando una instancia determinada.

Las capacidades de la animación demuestran ser muy útiles para quienes están aprendiendo a manejar el sistema, precisamente para comprender la metodología de modelado del EZStrobe “aprendiendo y viendo”.

3.4.6. Reporte e interpretación de datos

La información presentada en el reporte estándar nos da una instantánea del estado del proceso de simulación al momento de la ejecución del reporte.

Esto incluye información que describe la condición actual del proceso de simulación (ej., el contenido de un Nodo de cola al momento del reporte, o el valor del reloj de simulación). Así como valores estadísticos que describen el comportamiento del sistema al momento del reporte (ej., la duración promedio de las instancias de una actividad, o el contenido promedio de un Nodo de cola).⁸

La mayoría de información en un reporte estándar es de naturaleza dinámica, la información cambia mientras el modelo simulado es procesado. Por ejemplo el número de instancias de una actividad consideradas al momento de la ejecución no es el mismo antes y después que una instancia de la actividad es creada, aunque los momentos poco antes y poco después de su creación existe en el mismo momento de la simulación.

⁸ Julio C. Martinez; STROBOSCOPE - Status and resource based simulation of construction process, Pág. 66.

CAPÍTULO IV ESTADÍSTICA INFERENCIAL

4.1. ¿QUÉ ESTUDIA LA ESTADÍSTICA INFERENCIAL?

La estadística Inferencial, es el proceso por el cual se deducen (infieren) propiedades o características de una población a partir de una muestra significativa. Uno de los aspectos principales de la inferencia es la estimación de parámetros estadísticos.

La inferencia siempre se realiza en términos aproximados y declarando un cierto nivel de confianza.

4.2. DISTRIBUCIONES MUESTRALES

4.2.1. Población

Se denomina población o universo a la totalidad de personas u objetos que tienen una o más características medibles o contables de naturaleza cualitativa o cuantitativa.

La característica medible o contable es una variable estadística cuyo valor numérico o no numérico, es una observación.

Por el número de observaciones la población puede ser finita de tamaño N , o infinita.¹

4.2.2. Parámetros

Se denomina parámetros a las medidas descriptivas que caracterizan a la distribución de la población, estas pueden ser la media, proporción, varianza, desviación estándar, etc.

En diversas aplicaciones estadísticas al estudiar una población, la variable aleatoria que la define puede tener distribución conocida o no. La distribución aleatoria es conocida, si se conocen sus parámetros y su forma, es decir, si se conoce su distribución de probabilidad. Si la distribución de la población es

¹ Manuel Córdova Zamora; Estadística Inferencial, Pág. 1

desconocida, podemos estar interesados en: estimar sus parámetros y probar acerca del tipo de distribución de probabilidades de la población.²

4.2.3. Muestra

Una muestra es un subconjunto de la población. Se examina una muestra en lugar de examinar la población entera, lo cual puede resultar físicamente imposible o no práctica, puede examinarse una muestra de la población con el propósito de inferir los resultados encontrados.³

4.2.4. Muestreo

Proceso que nos permite la extracción de una muestra a partir de una población. Hay dos tipos básicos de muestreo:

Muestreo no probabilístico: Es aquel donde la selección de los elementos de la muestra no se hacen al azar.

Muestreo probabilístico: En este tipo de muestreo, la probabilidad de aparición en una muestra de la población es conocida (o calculable). Es el único científicamente válido y es sobre el que nos extenderemos especialmente. A las muestras probabilísticas se les llama también muestras aleatorias. Dentro del muestreo probabilístico tenemos:

1. **Muestreo al azar simple:** Es aquel en el que los elementos de la muestra se escogen del total de la población en forma individual con una oportunidad igual e independiente. Por lo general se usa una tabla de números aleatorios.⁴
2. **Muestreo estratificado:** Primero se clasifican a los elementos de la población en subgrupos separados de acuerdo con una o más características importantes (estrato), después se obtiene por separado una muestra aleatoria simple o sistemática en cada estrato. El tamaño de

² Manuel Córdova Zamora; Estadística Inferencial, Pág. 2

³ Manuel Córdova Zamora; Estadística Inferencial, Pág. 2

⁴ Manuel Córdova Zamora; Estadística Inferencial, Pág. 3

la submuestra debe ser proporcional al tamaño del estrato para asegurar representatividad.⁵

3. **Muestreo por conglomerados:** Denominado también muestreo agrupado se utiliza cuando se trata de obtener una muestra al azar de una población dispersa en una gran área geográfica. Los elementos de la población se dividen en forma natural en subgrupos. Luego se eligen al azar los subgrupos que forman la muestra.⁶
4. **Muestreo al azar sistemática:** En este caso, lo que se hace es ordenar los elementos de la población, después se elige aleatoriamente un elemento entre los $k=N/n$ primeros, luego se elige de manera sistemática el que esté k lugares después del primer elemento y así sucesivamente. Donde n es el tamaño de la muestra y N el tamaño de la población.

4.3. PRUEBAS DE HIPÓTESIS

4.3.1. Premisas o hipótesis

Con el fin de tomar alguna acción o decisión, en muchas ocasiones se parte de algunas premisas que son tomadas por ciertas mientras no se obtenga alguna evidencia o información que las contradiga. Las premisas o hipótesis proveen un guía sobre qué tipo de comportamiento generalmente esperar.

En estadística es de interés establecer y comprobar hipótesis sobre aquellos parámetros poblacionales que determinan o influyen en el comportamiento de lo que observamos. Las hipótesis estadísticas se establecen para tomar decisiones sobre el valor de algún parámetro poblacional.⁷

4.3.2. Hipótesis nula

La premisa de la cual se parte sobre el comportamiento de la población se conoce como la hipótesis nula. La hipótesis nula se denota usualmente en

⁵ Manuel Córdova Zamora; Estadística Inferencial, Pág. 3

⁶ Manuel Córdova Zamora; Estadística Inferencial, Pág. 4

⁷ Pedro Juan Rodríguez Esquero; Pruebas de Hipótesis, Pág. 2

símbolos por H_0 . El cero nos recuerda que se parte de la premisa de que el efecto es nulo.⁸

4.3.3. Hipótesis alternativa

Esta es representada por H_1 o por H_A y es la suposición contraria a la hipótesis nula. La hipótesis alternativa H_1 se acepta en caso de que la hipótesis nula H_0 sea rechazada.⁹

4.3.4. Tipos de error y poder de la prueba:

Luego de diseñar el experimento, obtener datos y analizarlos el investigador debe basarse en los resultados observados para tomar una decisión sobre su hipótesis. Esta decisión puede ser la de rechazar la hipótesis nula a favor de la alternativa. En el caso en que no haya evidencia suficiente, la decisión será la de no rechazar la hipótesis nula.

La decisión tomada debe reflejar y ser coincidente con la realidad poblacional desconocida. Sin embargo, esto no siempre ocurre, aún en el experimento, encuesta o estudio mejor diseñado y realizado, por la variabilidad inherente en las medidas y en la muestra seleccionada existe siempre la posibilidad de cometer algún tipo de error estadístico.

1. Error tipo I

La realidad poblacional tiene sólo uno de dos posibles estados: la hipótesis nula es cierta; o la hipótesis nula es falsa. Si la hipótesis nula es cierta debemos rechazar la hipótesis alternativa. En el caso en que sea falsa debemos rechazarla a favor de la alternativa. Sin embargo, los datos contienen necesariamente elementos de variación pues generalmente provienen de una muestra que puede ser o no representativa.

⁸ Pedro Juan Rodríguez Esquero; Pruebas de Hipótesis, Pág. 3

⁹ Manuel Córdova Zamora; Estadística Inferencial, Pág. 106

Una muestra, aún tomada científicamente siempre tendrá una pequeña probabilidad de no reflejar la realidad poblacional. Así que aún habiendo usado una metodología científica para tomar la mejor muestra posible, es posible que cometamos el error de tomar la decisión de rechazar la hipótesis nula aún siendo cierta.

Este tipo de error se conoce como error tipo I. La probabilidad de cometer error tipo I se conoce como la significancia de la prueba y se denota usualmente por la letra griega alfa (α). La probabilidad de cometer error tipo I se escribe de la siguiente manera:

$$\alpha = P(\text{Rechazar } H_0 \mid H_0 \text{ es cierta})$$

Los valores de uso más común para la significancia de una prueba son 0.01, 0.05 y 0.10. La significancia es en ocasiones presentada como un por ciento, tal como 1%, 5% o 10%. Esto quiere decir que el investigador está dispuesto a permitir una probabilidad de 0.01, 0.05, o 0.10 de rechazar la hipótesis nula cuando es cierta, o de cometer un error tipo I.

El valor de la significancia es seleccionado antes de comenzar la prueba. El valor de α puede estar dictado por el uso y costumbre de la disciplina o puede ser seleccionado tomando en cuenta el costo de cometer un error tipo I. Cuanto más alto el costo, más pequeña debe ser la probabilidad α de cometer error tipo I.

Esta probabilidad no puede ser igual a cero ya que si se desea que $\alpha = 0$, nunca se podría tomar la decisión de rechazar la hipótesis nula. Siempre que se tome la decisión de rechazar la hipótesis nula, ya que la decisión se basa en una muestra y no en la población, existe una probabilidad positiva de cometer un error tipo I.

2. Error tipo II

En el caso en que la hipótesis nula no sea cierta, algunos datos pueden llevarnos a no rechazarla, cometiendo entonces un error tipo II.

Usualmente no controlamos este tipo de error directamente. Una vez que decidimos el nivel de error tipo I aceptable, la probabilidad de cometer error tipo II asume su valor mínimo al usar las pruebas estadísticas que estudiamos aquí. Este valor mínimo no es cero e incluso puede ser considerado muy alto por algunos. Es usual denotar la probabilidad de error tipo II por la letra griega β . Entonces

$$\beta = P(\text{No rechazar } H_0 \mid H_0 \text{ es falsa})$$

3. Resumen de los tipos de error estadísticos (Ver tabla 4.1)

Tabla 4.1: Errores Estadísticos		
Decisión tomada	Estado de la Realidad	
	H_0 es cierta	H_0 es falsa
Rechazar H_0	Error Tipo I: α	Decisión correcta
No rechazar H_0	Decisión correcta	Error Tipo II: β

La cantidad $\pi = 1 - \beta$ se conoce como el poder de la prueba. Es la probabilidad de rechazar H_0 cuando es falsa. Idealmente se quiere tener pruebas cuyo poder sea alto. Así el poder de la prueba se escribe:

$$\pi = 1 - \beta = P(\text{Rechazar } H_0 \mid H_0 \text{ es falsa})$$

4.4. PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE

Con mucha frecuencia no se conoce la distribución de probabilidad de la variable aleatoria en estudio, digamos X , y se desea probar la hipótesis de que X sigue una distribución de probabilidad particular. Por ejemplo, podría ser de interés probar la hipótesis de que X sigue una distribución normal, exponencial, erlang, gamma, etc.

Existen tres procedimientos para realizar pruebas de bondad de ajuste que son los más conocidos. El primero se basa en una técnica gráfica muy útil llamada **gráfica de probabilidad** (gráficas de diferencias, gráficas P-P y gráficas Q-Q), el

segundo procedimiento se basa en la **distribución Chi-cuadrada** y el tercero la prueba de **Kolmogorov-Smirnov**.

4.4.1. Gráfica de probabilidad:

La gráfica de la probabilidad es un método gráfico para determinar si los datos se ajustan a una distribución hipotética basada en un examen visual subjetivo de los datos; el procedimiento general es muy simple y puede efectuarse con rapidez.

1. **Gráficas de diferencias:** Un gráfico de diferencias muestra el error absoluto entre la distribución ajustada y los datos de entrada.¹⁰ (Ver figura 4.1)

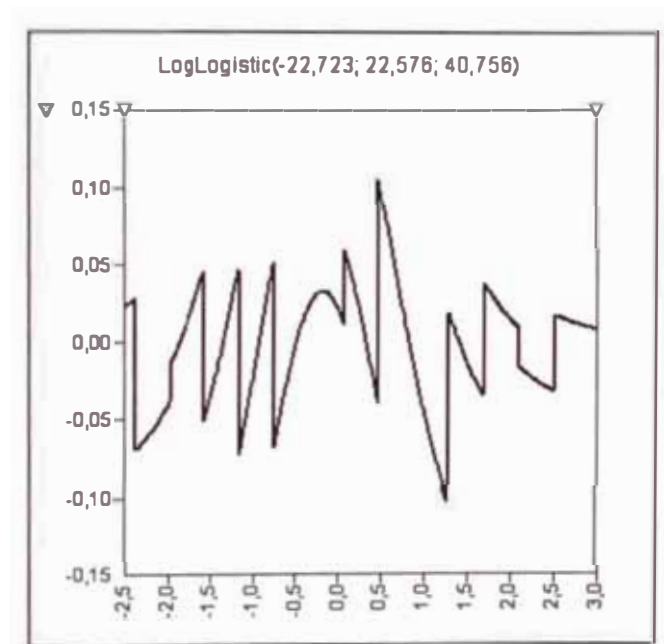


Figura 4.1: Gráfica de diferencias

2. **Gráficas P- P y Gráficas Q-Q:** Los gráficos de Percentil-Percentil (P-P) muestran la distribución de los datos de entrada (P_i) en comparación con la distribución del resultado ($F(x_i)$). Si el ajuste es "bueno", la gráfica será casi lineal. Los gráficos P-P sólo se pueden hacer para ajustes de datos de muestra. Los gráficos de Cuartil-Cuartil (Q-Q) muestran los valores de percentil de la distribución de entrada (X_i) en comparación con los valores de percentil del resultado ($F^{-1}(P_i)$). Si el ajuste es "bueno", la gráfica será

¹⁰ Palisade Corporation; Guía para el uso de @RISK, Pág. 158

casi lineal. Los gráficos Q-Q sólo se pueden hacer para ajustes de datos de muestra continuos.¹¹ (Ver figura 4.2 Y 4.3)

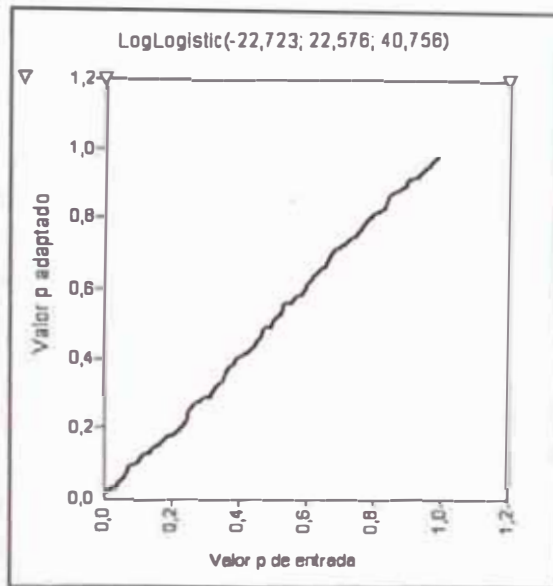


Figura 4.2: Gráfica de Percentil-Percentil o Gráfica P-P

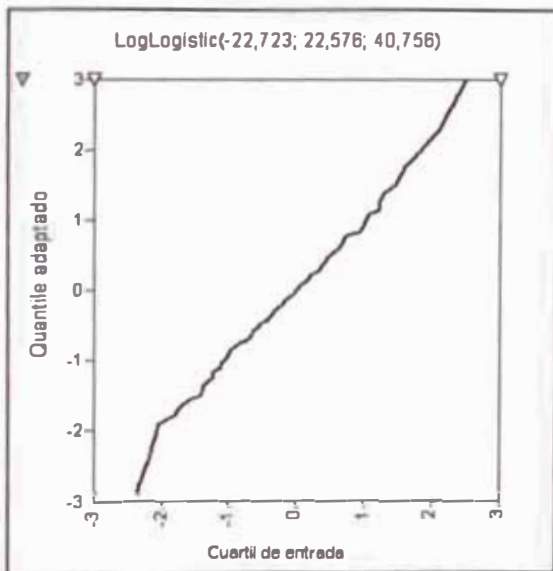


Figura 4.3: Gráfica de Cuartil-Cuartil o Gráfica Q-Q

4.4.2. La prueba de Chi-Cuadrada:

La prueba de Chi-cuadrado es considerada como una **prueba no paramétrica** o de **distribución libre** que mide la discrepancia entre una distribución observada

¹¹ Palisade Corporation; Guía para el uso de @RISK, Pág. 159

y otra teórica (bondad de ajuste), indicando en qué medida las diferencias existentes entre ambas, de haberlas, se deben al azar.

La prueba de Chi-cuadrado es la estadística que mejor muestra la idoneidad de un ajuste. Se puede utilizar tanto con datos de muestra continuos como independientes. Para calcular la estadística Chi-cuadrado, primero debe dividir el eje x en varios "compartimentos".¹²

La estadística Chi-cuadrado se define entonces como:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(N_i - E_i)^2}{E_i}$$

Donde:

K : Número de compartimentos

N_i : Número observado de muestras en el compartimento i

E_i : Número esperado o teórica de muestras en el compartimento i

Uno de los inconvenientes de la estadística Chi-cuadrado es que no hay normas claras para seleccionar el número y localización de los compartimentos. En algunas situaciones, pueden alcanzarse diferentes conclusiones a partir de unos mismos datos dependiendo de cómo se establecieron los compartimentos.

Criterio de decisión:

Se acepta H_0 cuando $\chi^2 < \chi^2_{\alpha}(n-1)$. En caso contrario se rechaza. Donde t representa el valor proporcionado por las tablas, según el nivel de significación elegido. Cuanto más se aproxima a cero el valor de Chi-cuadrado, más ajustadas están ambas distribuciones.

Procedimiento:

¹² Palisade Corporation; Guía para el uso de @RISK, Pág. 161

1. Elaborar el histograma de frecuencias relativas, con la que podemos apreciar cuál sería la función teórica de densidad que se ajusta mejor a los datos del histograma.
2. Desarrollo de la prueba estadística.
3. Planteamiento de hipótesis

H_0 : La variable en estudio se ajusta a determinada distribución teórica (Uniforme, exponencial, normal, Poisson).

H_A : La variable en estudio tiene un comportamiento aleatorio que no se ajusta a determinada distribución teórica.

4. Establecimiento del nivel de significación o error tipo I.
5. Cálculos previos y estimación de la frecuencia esperada o teórica.
6. Criterios de decisión:

Se acepta H_0 , si $X^2 \leq X_{\alpha}^2$

Se rechaza H_0 si $X^2 > X_{\alpha}^2$

4.4.3. La prueba de Kolmogorov-Smirnov:

Es una prueba no paramétrica que comúnmente se utilizan para verificar si una distribución se ajusta o no a una distribución esperada. La prueba de Kolmogorov-Smirnov es bastante potente con muestras grandes aleatorias continuas. Esta prueba puede en todos los casos en que se aplique ser más poderosa que su prueba alternativa (Chi-cuadrada).

Determina si razonablemente puede pensarse que la muestra provenga de una población que tenga una distribución teórica. En la prueba se compara la distribución de frecuencia acumulativa de la distribución teórica con la distribución de frecuencia acumulativa observada. Se determina el punto en el que estas dos distribuciones muestran la mayor divergencia.

Hipótesis

H_0 : La distribución observada se ajusta a la distribución teórica.

$$F(x_i) = F_t(x_i) \text{ para todo } x.$$

H_A : La distribución observada no se ajusta a la distribución teórica.

Donde:

$F(x_i)$ y $F_t(x_i)$ son funciones para algún X_i

$F(x_i)$: Es la función desconocida

$F_t(x_i)$: Es la función teórica. Esta puede ser por ejemplo la función normal con cierta media y varianzas conocidas.

$S_n(x)$: Es la función de distribución empírica.

Se tiene que calcular la máxima desviación:

$$D = \text{máxima } | F_t(X_i) - S_n(X_i) |$$

CAPÍTULO V CONSTRUCCIÓN SIN PÉRDIDAS

5.1. CONCEPTO

Lo que se conoce como construcción sin pérdida es una nueva manera de aplicar la gestión de producción en la industria de la construcción.¹

En primer lugar, lo que diferencia a la construcción sin pérdida de las prácticas convencionales es su enfoque en las pérdidas y en la reducción de las mismas. El segundo punto fundamental es el manejo del modelo de flujos en oposición al modelo de conversión.² Esta nueva filosofía apunta a mejorar tanto los procesos como los flujos.

El modelo de flujo de procesos permite visualizar las abundantes pérdidas que usualmente se encuentran en la construcción y que el modelo de conversión no permite ver. En la siguiente tabla están resumidas las principales diferencias entre el modelo "Tradicional" y "Sin perdida". (Ver tabla 5.1)

Tabla 5.1: Diferencia entre los modelos		
	Modelo de Conversión Tradicional	Producción "Sin Pérdidas"
Conceptualización de la producción	La producción consiste en conversiones y todas añaden valor al producto	La producción consiste de conversiones y flujos, sólo las primeras agregan valor al producto.
Enfoque de control	Dirigido hacia el costo de las actividades	Dirigido hacia el costo, tiempo y valor de los flujos.
Enfoque de mejoramiento	Incremento de la eficiencia por medio de la adopción de nueva tecnología.	Eliminación de actividades que no agregan valor, mejoramiento continuo de la eficiencia de actividades que agregan valor y adopción de nueva tecnología.

Gráficamente también se puede observar que en el primer caso se considera que el sistema es administrado por un ente controlador, el cual regula los insumos, establece características operacionales de las conversiones y se

¹ Virgilio Ghio Castillo; Productividad en obras de construcción, Pág. 30

² Virgilio Ghio Castillo; Productividad en obras de construcción, Pág. 31

retroalimenta de los productos.³ (Ver figura 5.1)

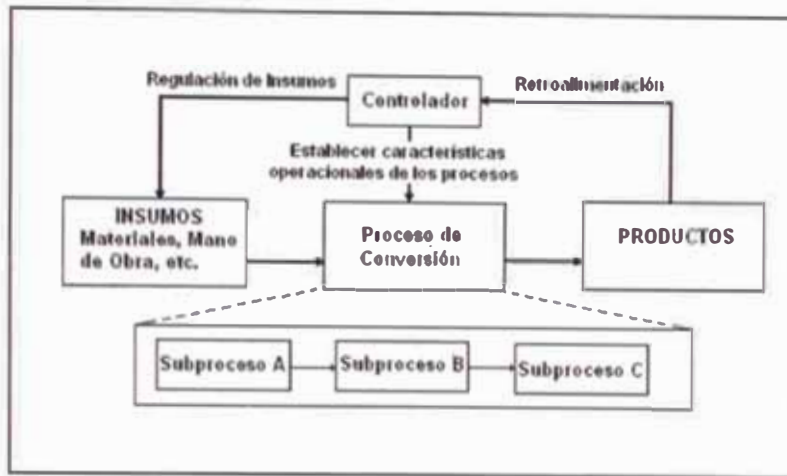


Figura 5.1: Modelo de Conversión Tradicional

En este segundo caso los flujos pueden ser de materiales o de información y los más típicos son el transporte, la espera y la inspección. Este nuevo modelo de producción muestra que solo se agrega valor en la actividad sombreada. (Ver figura 5.2)

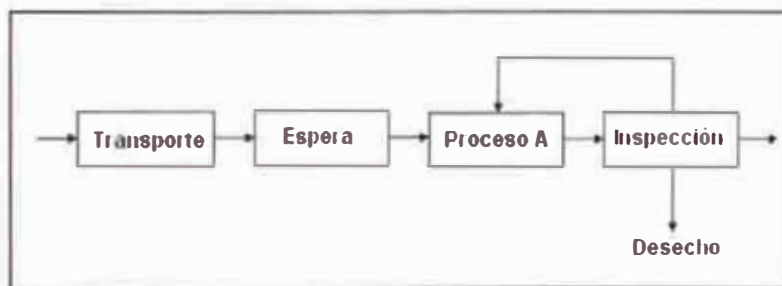


Figura 5.2: Nuevo modelo de producción

5.2. OBJETIVOS DE CONSTRUCCIÓN “SIN PÉRDIDA”

Como la Construcción “Sin Pérdida” se enmarca dentro de los conceptos del Mejoramiento continuo, su objetivo principal es mejorar continuamente el desempeño con que son realizados los proyectos de construcción. Hoy en día el desempeño involucra todos los aspectos del proceso de construcción transformándose en una variable multidimensional.⁴

³ Luís Amando López Salas; Producción sin Pérdida en la Construcción, Pág. 58

⁴ Luís Amando López Salas; Producción sin Pérdida en la Construcción, Pág. 61

¿Qué mediciones se deben hacer para medir el desempeño?

La medición de datos se requiere por dos motivos:

1. Para conducir el mejoramiento interno de la organización.
2. Para comparar los datos obtenidos de los indicadores escogidos.

Para las organizaciones directamente implicadas en la construcción el primer motivo es el principal, mientras que para el cliente final el segundo pasa a ser mucho más importante.

¿Cuáles son esos indicadores?

Los indicadores más importantes enfocados en los flujos, según la visión de Construcción sin Pérdida, deben ser:

1. **Pérdidas:** Tales como la cantidad de defectos, adaptaciones, el número de errores de diseño u omisiones, la cantidad de órdenes de cambio, gastos en seguridad, el exceso de materiales y el porcentaje de tiempo que no agrega valor al ciclo total.⁵
2. **Valor:** Se define como el grado de satisfacción del cliente final, o sea, que todos sus requerimientos sean cumplidos sin inconvenientes. El valor debe ser medido por un proceso de medición posterior a la construcción.
3. **Tiempo de Ciclos:** Los tiempos del ciclo principal y de sus subprocesos son uno de los indicadores más poderosos.⁶
4. **Variabilidad:** La producción en la construcción variará con alguna desviación estándar.⁷ Ausencia de variabilidad significa producción confiable.

¿Cuáles son las categorías de desempeño?

Los índices de desempeños de mayor importancia, por categoría son:

⁵ Lauri Koskela; Aplicación de la nueva filosofía de producción a la construcción, Pág. 39

⁶ Lauri Koskela; Aplicación de la nueva filosofía de producción a la construcción, Pág. 39

⁷ Lauri Koskela; Aplicación de la nueva filosofía de producción a la construcción, Pág. 39

1. **Por variables:** Índices de desempeño de acuerdo con las **variables** involucradas en un proyecto. (Ver tabla 5.2)

Tabla 5.2: Desempeño por variables		
Variables	Parámetros	Unidades
Seguridad	Índice de Accidentabilidad	(Número de accidentes) x 100 / Número total de trabajadores
	Tasa de Riesgo	(Número de días perdidos) x 100 / Promedio anual de trabajadores

2. **Por procesos:** Índices de desempeño de los procesos involucrados en un proyecto. (Ver tabla 5.3)

Tabla 5.3: Desempeño por proceso		
Procesos	Parámetros	Unidades
Construcción	Productividad Rendimiento	Real vs. Presupuestada
		HH/m ³ , HH/ml, etc. | \$/m ³ , \$/ml, etc.
	Trabajo Rehecho	HH trabajo Rehecho / HH totales
	Pérdida de Materia	% de pérdidas de materiales con respecto al Total Completado
	Equipos	HM Reales / HM Presupuestadas
Abastecimiento	Atrasos	Nº de pedidos atrasados / Nº total de pedidos
		Nº de actividades en espera / Nº de actividades en el periodo
	Conformidad con especificaciones	Nº de pedidos con errores / Nº total de pedidos
Planificación	Efectividad de la Planificación	% de actividades Completadas = Nº de actividades totalmente Completadas / Nº de actividades planificadas
Gestión	Avance	HH vendidas / HH presupuestadas
Diseño e Ingeniería	Cambios de Diseño	Nº de cambios / Total de Planos
	Errores/Omisiones	Nº de errores / Total de Planos

3. **Por resultados:** Índices de desempeño **globales** del proyecto. (Ver tabla 5.4)

Tabla 5.4: Desempeño por resultado		
Resultados	Parámetros	Unidades
Costo	Desviación del Costo	Costo Real / Costo Presupuestado
Plazo	Desviación del Plazo	Plazo Real / Plazo Presupuestado
Mano de Obra	Eficiencia de la MO	HH Real / HH Presupuestada
		Costo Real MO / Costo Presupuestado MO
Alcance de Obra	Cambio en alcance del Proyecto	Costo de ordenes de Cambio/ Costo Presupuestado
Calidad	No Conformidad	Número de no cumplimientos
		Costo del No cumplimiento / Costo total de la Obra
	Cuadrillas de remate	Costo de MO de cuadrilla / Costo MO Total

A su vez estos indicadores deben cumplir los siguientes requisitos:

1. **Especificidad:** Deben estar relacionados con aspectos, etapas y resultados clave del proyecto o del proceso.
2. **Simplicidad:** Deben ser de fácil aplicación, comprensión y medición.
3. **Bajo costo:** El costo de la medición debe ser significativamente menor que el potencial ahorro.
4. **Representatividad:** Debe dar información veraz y confiable del proceso evaluado.

5.3. PRINCIPIOS DE CONSTRUCCIÓN SIN PÉRDIDAS

5.3.1. Reducir las actividades que no agregan valor (Pérdidas):

Las actividades que no agregan valor, también conocida como pérdidas, son aquellas que toman tiempo, recurso o espacio y no añaden valor al producto en proceso.⁸ Sin embargo, este principio no puede ser usado simplistamente, existen actividades que al parecer no agregan valor al cliente externo, pero si agregan valor a clientes internos (prevención de accidentes)

⁸ Lauri Koskela; Aplicación de la nueva filosofía de producción a la construcción, Pág. 15

¿Por qué hay actividades que no generan valor?

1. **Diseño:** Cada vez que una tarea es subdividida en dos subtareas ejecutadas por diferentes cuadrillas, las actividades que no añaden valor se incrementan (inspección, movimiento y espera).
2. **Ignorancia:** Muchos procesos no han sido diseñados ordenadamente y la cantidad de actividades generadas que no añaden valor no es medido y por tanto es imposible controlarlas.
3. **Naturaleza inherente de la Producción:** El trabajo en proceso tiene que ser movido de una conversión a otra, aparecen los defectos y ocurren accidentes.

¿Cómo reducir las actividades que no agregan valor?

1. Detallando con un diagrama de flujo el sistema.
2. Analizando y evaluando este diagrama para mejorarlo y proponerlo.
3. Efectuando entrenamiento con el personal para aplicarlo en obra y seguir mejorando el diagrama en forma continua hasta obtener el óptimo.

5.3.2. Incrementar el valor del producto a través de la consideración sistemática de los requerimientos del cliente:

Para cualquier tipo de conversión hay dos tipos de clientes: el cliente de la siguiente actividad y el cliente final.

En este principio se toma en cuenta que el fin de cualquier producto es satisfacer necesidades del cliente.

¿Cómo lograr incrementar el valor del producto?

1. Manteniendo una relación con el consumidor, donde este último pueda manifestar los requerimientos que debe cumplir el producto. En la medida que esto se cumpla, la calidad del producto será mayor para el cliente y este tendrá mejor disposición para aceptarlo.
2. Se determinará un mapa o cuadro del proceso identificando sistemáticamente los clientes y sus requerimientos para cada etapa.

5.3.3. Reducir la variabilidad:

Los procesos constructivos son variables. Hay diferencias en los resultados obtenidos, aunque se tratase del mismo producto y recursos empleados (tiempo, materias primas, mano de obra). Así la reducción de la variabilidad dentro de un proceso debe ser considerada un objetivo intrínseco.

¿Por qué reducir la variabilidad?

1. Desde el punto de vista del cliente un producto uniforme es mejor, esto se logra con la conformidad de las especificaciones.⁹
2. La variabilidad, especialmente de la duración de la actividad, incrementa el volumen de actividades que no agregan valor (aumento del tiempo del ciclo del proceso).¹⁰

¿Cómo reducir la Variabilidad?

1. Se deberá medir la variabilidad, encontrar y eliminar sus causas raíz mediante el uso de sistemas estadísticos.
2. Se deberá estandarizar las actividades implementando procedimientos tanto en la conversión como en flujos.

5.3.4. Reducir el tiempo del ciclo:

El tiempo es el más usado y universal que el costo y la calidad, porque puede ser usado para conducir mejoras en ambos.¹¹ El tiempo de ciclo es como sigue:

$$\text{TIEMPO DE CICLO} = \text{Tiempo de Procesamiento} + \text{Tiempo de Inspeccion} + \text{Tiempo de Espera} + \text{Tiempo de Transporte}$$

Se busca disminuir el tiempo del ciclo mediante la reducción de las últimas tres componentes de esta variable. Cuanto más corto sea el tiempo de ciclo, más ciclos serán posibles.

⁹ Lauri Koskela; Aplicación de la nueva filosofía de producción a la construcción, Pág. 16

¹⁰ Lauri Koskela; Aplicación de la nueva filosofía de producción a la construcción, Pág. 16

¹¹ Lauri Koskela; Aplicación de la nueva filosofía de producción a la construcción, Pág. 16

¿Cómo reducir el tiempo del Ciclo?

1. Disminuyendo las capas de la organización jerarquica, capacitando al personal que directamente trabaja en el flujo para que puedan tomar decisiones de control y calidad.
2. Eliminando los movimientos entre procesos con el objetivo de reducir tiempos de espera y así el tiempo del ciclo.
3. Cambiando la disposición de planta con el fin de reducir las distancias al mínimo.
4. Manteniendo el sistema en movimiento, suavizando y sincronizando los flujos.
5. Identificando las actividades que podrían cambiar de orden secuencial a orden paralelo.
6. Mejorando la toma de datos en terreno, buscando la estandarización.

5.3.5. Simplificación disminuyendo el número de partes y pasos:

La simplificación puede ser entendida como:

1. Reducir el número de componentes de un producto.
2. Reducir el número de pasos en el flujo de material o de información.

¿Cómo lograr la simplificación?

1. Eliminando las actividades que no añaden valor del flujo productivo (evaluando la calidad y el grado de aprendizaje de la mano de obra).
2. Reconfigurando partes o pasos que no añaden valor (cambios de diseño).
3. Cambios organizacionales (creando unidades autosostenidas).
4. Estandarizando partes, materiales, herramientas.

5.3.6. Incrementar la Transparencias de los procesos:

La carencia de transparencia en los procesos oculta errores, dificulta su solución y disminuye la motivación para la mejora y control.

¿Cómo incrementar la transparencia de los procesos?

1. Incorporar la información de los procesos en las áreas de trabajo, instrumentos, contenedores, materiales y sistemas de información.

2. La utilización de órdenes visuales para permitir a cualquier persona reconocer normas y desviaciones de ellas.
3. Hacer los procesos directamente observables, es decir, el flujo principal de operaciones debe ser observable de inicio a fin a todos los trabajadores, a través de planos en planta.

5.3.7. Enfocar el control en el proceso completo:

Hay dos causas para un flujo segmentado:

1. El flujo atraviesa diferentes unidades en una unidad jerárquica.
2. Cruza a través de una frontera organizacional

¿Cómo controlar el proceso completo?

1. El proceso completo debe ser medido.
2. Debe haber una autoridad responsable por todo el proceso.

5.3.8. Crear el Mejoramiento Continuo dentro del proceso:

La Mejora Continua es el esfuerzo para reducir los desperdicios y para incrementar el valor. La Mejora continua es una actividad interna creciente e iterativa que debe ser llevado continuamente.¹² (Ver figura 5.3)

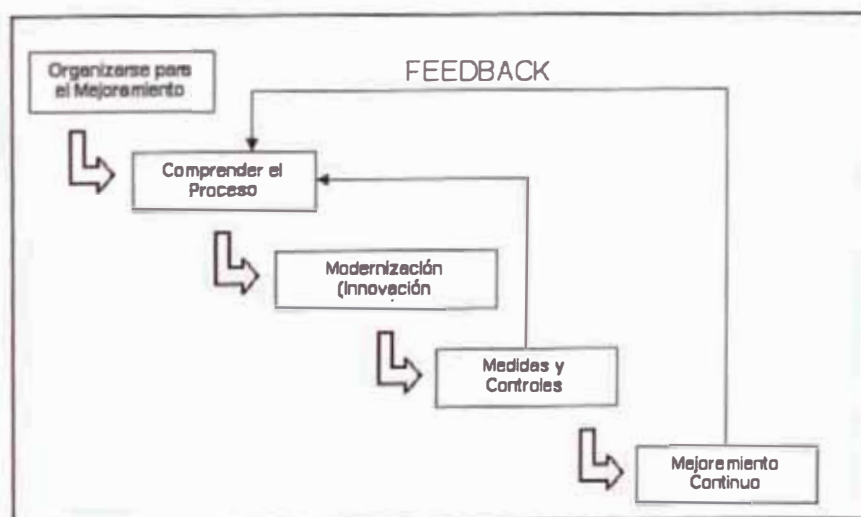


Figura 5.3: Proceso de mejoramiento continuo en cualquier proceso productivo.

¹² Lauri Koskela; Aplicación de la nueva filosofía de producción a la construcción, Pág. 21

¿Cómo lograr la Mejora Continua?

1. Trabajando en equipo y fomentando la gestión participativa, ambos son requisitos esenciales para la introducción de las mejoras continuas en los procesos.
2. Creando una metodología de identificación de las causas de problemas es la base para comenzar la estandarización de los procesos.
3. Estandarizando los procedimientos, consolidando las buenas prácticas constructivas y utilizándolas de referencia para futuras mejoras.
4. Analizando las causas de no cumplimiento de la planificación para conseguir el mejoramiento de los procesos y usando una metodología para identificar y medir estadísticamente las razones de no conformidad.

5.3.9. Equilibrar el mejoramiento de los flujos con el mejoramiento de la eficiencia de las conversiones.

Las mejoras en la eficiencia de los procesos debe acompañarse de una mejora en los flujos que las haga factible.

¿Cómo lograr que estas dos alternativas sean balanceadas?

Reconociendo que para los aspectos relacionados al flujo y a la conversión tienen cada uno potenciales diferentes como:

1. A mayor complejidad del proceso de producción, mayor es el impacto del mejoramiento del flujo.
2. A mayor desperdicio inherente a los procesos de producción, mayor es el provecho en el mejoramiento del flujo en comparación a la mejora de conversión.
3. El punto crucial es comprender que el mejoramiento del flujo y el mejoramiento de conversión están íntimamente relacionados y no olvidar las siguientes consideraciones:
 - ✓ Los mejores flujos requieren menor capacidad de conversión por lo tanto, menor inversión de equipamiento.

- ✓ Mayores flujos controlados hacen más fácil la implementación de nuevas tecnologías de conversión.
- ✓ Nuevas tecnologías de conversión podrían ocasionar variabilidades más pequeñas y así flujos más beneficiosos.
- ✓ Es prioritario buscar el mejoramiento de los flujos de los procesos antes que invertir en nuevas tecnologías de conversión.
- ✓ Se debe perfeccionar procesos existentes antes que diseñar otras nuevas.
- ✓ Posteriormente invertir en tecnología para el mejoramiento o rediseño del flujo.

5.3.10. Referenciar permanentemente los procesos (Benchmark):

A menudo, el Benchmarking es un estímulo útil para alcanzar la brecha de mejoramiento. Esto ayuda a vencer viejas rutinas inculcadas y las malas prácticas. Mediante ello, defectos fundamentales lógicos en los procesos pueden ser desenterrados.

Los pasos básicos del Benchmarking son los siguientes (Camp 1989):

1. Saber del proceso; evaluación de las fuerzas y las debilidades de los subprocesos.
2. Saber acerca de los líderes de la industria o competidores; encontrar, entender y comparar las mejores prácticas.
3. Incorporar a las prácticas convencionales lo mejor; copiar, modificar o incorporar en sus propios procesos.

5.4. CALIDAD

5.4.1. Concepto

Como es de notarse Calidad no implica mérito ni se relaciona con excelencia; en un sentido ingenieril, Calidad es el grado de cumplimiento con los requerimientos, tomando en cuenta parámetros de medición como las normas, estándares o requisitos especiales, costos y plazos¹³, buscando equilibrar las

¹³ Luís Armando López Salas; Producción sin Pérdida en la Construcción, Pág. 35

necesidades del consumidor y los medios con que cuenta el productor. En la construcción este equilibrio puede producirse por acuerdos entre las partes.

Las normas y estándares deben proporcionar la guía necesaria para establecer un modelo de aseguramiento y control de calidad para un proyecto determinado.¹⁴

5.4.2. Importancia de Introducir la Calidad en la Construcción

En la industria de la Construcción los problemas son importantes, ya que el producto o resultado no siempre se adapta completamente a los requerimientos especificados, un 80% corresponden a desviaciones en el diseño y un 20% a desviaciones en la etapa de construcción del proyecto.¹⁵ Todo esto debido a:

Primero a las grandes diferencias de criterio e intereses; segundo a la movilidad de los grupos de diseño y construcción que dificultan el logro de una alta eficiencia y efectividad en el proceso productivo; tercero no hay un desarrollo completo y claro de estándares precisos para la evaluación de la calidad del diseño y de la construcción. Finalmente, la realimentación obtenida de los procesos actuales de diseño y construcción es muy escasa, por lo que es difícil realizar análisis previos de fallas o problemas.

Por lo tanto, para alcanzar la viabilidad del proyecto, se deben considerar tres aspectos: el costo, el plazo y la calidad. Si se asume que las condiciones entre costo y plazo no difieren considerablemente entre diferentes ofertas, entonces la calidad pasa a ser el elemento diferenciador que condiciona el éxito del proyecto.¹⁶

5.4.3. Herramientas para el control de la Calidad

Las experiencias indican que con las siete herramientas básicas de la calidad los problemas relacionados con la calidad disminuirían, mejorarían los procesos y se establecerían controles en las operaciones de los procesos.

¹⁴ Alfredo Serpell Bley; Administración de operaciones de construcción, Pág. 269

¹⁵ Luís Armando López Salas; Producción sin Pérdida en la Construcción, Pág. 35

¹⁶ Luís Armando López Salas; Producción sin Pérdida en la Construcción, Pág. 35

1. Diagrama de Causa Efecto:

Objetivo:

- ✓ Identificar la raíz o causa principal de un problema o efecto.
- ✓ Clasificar y relacionar las interacciones entre factores que están afectando al resultado de un proceso.

Característica:

- ✓ Los diagramas de causa efecto, ilustra como los diversos factores pueden estar vinculados con los posibles problemas o efectos, agrupado estas causas en distintas categorías, que generalmente se basan en maquinas, mano de Obra, materiales, etc.

Ventajas:

- ✓ Metodología simple y clara.
- ✓ Facilita el entendimiento y comprensión del proceso.
- ✓ Estimula la participación de los miembros del grupo de trabajo, permitiendo así aprovechar mejor el conocimiento que cada uno de ellos tiene sobre el proceso.

2. Diagrama de Control:

Objetivos:

- ✓ Entregar un medio para evaluar si un proceso constructivo está en estado de control estadístico, o si tiene un rendimiento predecible.

Característica:

- ✓ Gráfico donde se representan los valores de alguna medición estadística para una serie de muestras y que consta de una línea límite superior y una línea límite inferior, que definen los límites de capacidad del sistema.
- ✓ Los diagramas de control pueden servir como una herramienta de obtención de datos para mostrar cuando un proceso esta sujeto a una

variación por una causa especial, que crea una condición fuera de control.

- ✓ Estos diagramas también ilustran como se comporta un proceso a lo largo del tiempo.¹⁷

Ventajas:

- ✓ Son útiles para vigilar la variación de un proceso en el tiempo, probar la efectividad de las acciones de mejora emprendidas, así como para estimar la capacidad del proceso.
- ✓ Permite distinguir entre causas aleatorias (desconocidas) y específicas (asignables) de variación de los procesos.

3. Diagrama de Flujo:

Objetivos:

- ✓ Realizar una revisión crítica del proceso, proporcionando una visión general para facilitar su comprensión.
- ✓ Ayudar a analizar como se producen los problemas.

Característica:

- ✓ Representación gráfica que muestra las diferentes actividades y etapas asociadas a un proceso. Pueden ser de muchos estilos, pero todos los diagramas de flujo de procesos muestran actividades, puntos de decisión y el orden de procesamiento.
- ✓ La simbología usada en los diagramas de flujo, debe ser sencilla y fácil de entender y utilizar.
- ✓ Los diagramas de flujo pueden ayudar al equipo del proyecto a prever cuales pueden ser los problemas de calidad y donde pueden producirse y de esta forma desarrollar enfoques para tratarlos.¹⁸

Ventajas:

- ✓ Facilita la comprensión del proceso y promueve el acuerdo entre los miembros del equipo.

¹⁷ Guía del PMBOK; Fundamentos de la Dirección de Proyectos, Pág. 192

¹⁸ Guía del PMBOK; Fundamentos de la Dirección de Proyectos, Pág. 193

- ✓ Herramienta fundamental para obtener mejoras mediante el rediseño del proceso, o el diseño de uno alternativo.
- ✓ Identifica problemas, oportunidades de mejora y puntos de ruptura del proceso.

4. Histograma:

Objetivos:

- ✓ Revelar la posible estructura estadística de un grupo de datos para poder interpretarlos.

Característica:

- ✓ Un histograma es un diagrama de barras que muestra una distribución variable
- ✓ Cada columna representa un atributo o una característica de un problema/situación.
- ✓ La altura de cada columna representa la frecuencia relativa de la característica.¹⁹
- ✓ La aplicación de los histogramas está recomendada como análisis inicial en todas las tomas de datos que corresponden a una variable continua.

Ventajas:

- ✓ Su construcción ayudará a comprender la tendencia central, dispersión y frecuencias relativas de los distintos valores.
- ✓ Muestra grandes cantidades de datos dando una visión clara y sencilla de su distribución.
- ✓ Es un medio eficaz para transmitir a otras personas información sobre un proceso de forma precisa e inteligible.
- ✓ Esta herramienta ayuda a identificar la causa de los problemas en un proceso por la forma y anchura de la distribución.²⁰

¹⁹ Guía del PMBOK; Fundamentos de la Dirección de Proyectos, Pág. 194

²⁰ Guía del PMBOK; Fundamentos de la Dirección de Proyectos, Pág. 194

5. Diagrama de Pareto:

Objetivos:

- ✓ Poner de manifiesto los problemas más importantes sobre los que deben concentrarse los esfuerzos de mejora y determinar en qué orden resolverlos.

Característica:

- ✓ Un diagrama de Pareto es un tipo específico de histograma, ordenado por frecuencia de ocurrencia, que muestra cuantos defectos se han generado por tipo o categoría de causa identificada.
- ✓ La técnica de Pareto se usa principalmente para identificar y evaluar incumplimientos.
- ✓ Los diagramas de Pareto están conceptualmente ligados a la Ley de Pareto, que sostiene que un número relativamente pequeño de causas van a causar típicamente la gran mayoría de los problemas o defectos (80/20).²¹

Ventajas:

- ✓ Ayuda a concentrarse en las causas que tendrán mayor impacto sobre los defectos en los procesos.
- ✓ El ordenamiento por rango es usado para guiar la acción correctiva para arreglar problemas que están causando el mayor número de defectos.
- ✓ Ayuda a evitar que empeoren algunas causas al tratar de solucionar otras.

6. Muestreo Estadístico:

El muestreo estadístico involucra el escoger parte de una población de interés para inspección. El muestreo apropiado puede muchas veces reducir el costo del control de calidad. Existe un cuerpo sustancial de conocimiento sobre el muestreo estadístico; en algunas áreas de aplicación, es necesario

²¹ Guía del PMBOK; Fundamentos de la Dirección de Proyectos, Pág. 195

que el equipo administrativo del proyecto este familiarizado con una variedad de técnicas de muestreo.²²

7. Inspección:

La inspección incluye actividades tales como medición, examinación, y ensayos ejercidos para determinar si los resultados cumplen con los requerimientos. Las inspecciones pueden ser conducidas a cualquier nivel. Las inspecciones pueden ser llamadas repasos, repasos de producto, auditorias, e inspecciones visuales; en algunas áreas de aplicación, estos términos tienen significados precisos y específicos.²³

5.5. PRODUCTIVIDAD

Se puede definir la productividad como la medición de la eficiencia con que los recursos (personal, materiales, equipos y herramientas) son administrados para completar un producto dentro de un plazo y estándares de calidad.

No se mide sólo por producción, sino por una relación entre las unidades producidas y los recursos empleados.

Productividad Parcial: (m²/hh, m³/hh, m²/hm, etc.)

$$\text{Productividad Parcial} = \frac{\text{Cantidad Producida}}{\text{Recursos Empleados}}$$

Productividad Total: (m²/soles, m³/soles, m²/\\$)

$$\text{Productividad Total} = \frac{\text{Cantidad Producida}}{\text{Costo Incurrido}}$$

5.5.1. Factores que afectan la Productividad

En este caso serán enfocadas dentro del proceso constructivo entre ellas tenemos:

²² Guía del PMBOK; Fundamentos de la Dirección de Proyectos, Pág. 196

²³ Guía del PMBOK; Fundamentos de la Dirección de Proyectos, Pág. 196

- ✓ Cuadrillas sobredimensionadas
- ✓ Falta de supervisión
- ✓ Deficiencia en el flujo de materiales
- ✓ Mala distribución de instalaciones en obra
- ✓ Actitud del trabajador, trabajos lentos
- ✓ Mala calidad
- ✓ Deterioro en los trabajos ya realizados
- ✓ Cambios en los diseños
- ✓ Falta de programación y control en el uso de equipos
- ✓ Falta de diseño de los procesos constructivos

5.5.2. Herramientas para medir la Productividad

Las principales herramientas para medir la productividad de un proyecto de construcción son:

1. **Muestreo general del trabajo:** Tiene como objetivo medir el nivel de actividad de la obra y refleja el porcentaje de la jornada de trabajo que la fuerza laboral encuentra en una de las siguientes categorías de trabajo.²⁴

Trabajo Productivo (TP): Es aquel trabajo que aporta en forma directa a la producción.²⁵

Trabajo Contributorio (TC): Es aquel trabajo que debe ser realizado para apoyar la ejecución del trabajo productivo.²⁶

Trabajo No Contributorio (TNC): Son aquellas actividades que no se consideran en ninguna de las dos categorías anteriores.²⁷

2. **Encuesta de detención de capataces:** Es un cuestionario que es llenado por cada capataz al final de la jornada de trabajo. Sirve para informar de las detenciones y el número de hh pérdidas en la actividad que realiza cada cuadrilla bajo sus órdenes durante el día.²⁸

²⁴ Luís Armando López Salas; Producción sin Pérdida en la Construcción, Pág. 21

²⁵ Luís Armando López Salas; Producción sin Pérdida en la Construcción, Pág. 22

²⁶ Luís Armando López Salas; Producción sin Pérdida en la Construcción, Pág. 22

²⁷ Luís Armando López Salas; Producción sin Pérdida en la Construcción, Pág. 22

²⁸ Luís Armando López Salas; Producción sin Pérdida en la Construcción, Pág. 22

3. **Carta de Balance de recursos:** Permite seguir en forma detallada el uso de los recursos en una operación para identificar oportunidades de mejoramiento.²⁹
4. **Encuesta de Detección de Pérdidas:** Tiene como objetivo identificar pérdidas en obras de construcción y medir la frecuencia con la que se manifiesta los distintos tipos de pérdida.³⁰

5.6. PROGRAMACIÓN “SIN PERDIDA”

La programación “sin perdida” es una herramienta para controlar la interdependencia entre los procesos y reducir la variabilidad entre estos y por ende asegurar el mayor cumplimiento posible de las actividades de la planificación, todo ello orientado principalmente a la mejora en la confiabilidad de los flujos.

Este incremento de la confiabilidad se realiza tomando acciones principalmente en dos niveles: planificación intermedia (planificación anticipada de recursos) y planificación semanal. (Ver figura 5.5)



Figura 5.5: Estrategia de implementación de la Programación “Sin pérdida”

²⁹ Luís Armando López Salas; Producción sin Pérdida en la Construcción, Pág. 22

³⁰ Luís Armando López Salas; Producción sin Pérdida en la Construcción, Pág. 22

El punto de partida es acrecentar la confiabilidad de las asignaciones de trabajo al nivel de la producción misma, para ello se necesita contar con planificaciones de horizontes de tiempo más cortos que permita un control más directo y una rápida identificación de las restricciones del plan. De esta manera, se genera, un flujo de trabajo predecible, en cualquier punto de la producción, reduciendo la variación de los requerimientos de los recursos, así como el diseño de las operaciones subsecuentes.³¹

Tabla 5.5: Comparación entre programación tradicional y programación sin pérdida	
Sistema Tradicional	Sistema de Construcción "Sin pérdidas"
La lógica del sistema CPM se circunscribe a la utilización de un programa (Por ejemplo Primavera o Microsoft Project)	Aplicación del sentido Común
Requiere de una alta mantención en Post de seguir la ruta crítica propuesta inicialmente.	Baja mantención, pues cada involucrado realiza el seguimiento de sus propios compromisos.
Su principio fundamental es seguir la ruta crítica.	Su principio fundamental es el seguimiento de la variabilidad.
Se focaliza en el cumplimiento de las fechas propuestas.	Se focaliza en la dirección de los flujos de producción.
Se basa en los cumplimientos de los subcontratos principalmente.	Se focaliza en la interdependencia de todos los involucrados.

5.6.1. Planificación Maestra

La planificación maestra o por hitos viene a reemplazar a la programación general tradicional de obra, la cual planteaba toda la obra, lo que llevaba a analizar y programar un gran número de actividades, ver su correlación, determinar su compatibilidad en el uso de recursos y equipos, etc. Sin embargo, una planificación tan detallada en la que todas las actividades se encuentran correlacionadas, sin hitos, es poco flexible y bastante imprecisa. La poca confiabilidad que otorga obliga a volver a planificar la obra regularmente, sin

³¹ Virgilio Ghio Castillo; Productividad en Obras de Construcción, Diagnóstico, crítica y propuesta, Pág. 30, 31, 32.

embargo, dichas replanificaciones se traducen solo en empujar el final de los trabajos hacia atrás sin una corrección en los recursos basado en los metrados faltantes, lo que hace que termine siendo solo un marco de referencia.³²

Es por ello que se hace necesaria la planificación maestra, una planificación por hitos, simple y que toma mucho menor esfuerzo y tiempo. En la que el logro de los objetivos parciales se obtiene a través de planificaciones detalladas de corto plazo (look ahead planning), planificaciones semanales, planificaciones diarias), que comprenden horizontes de máximo cinco semanas y van de acuerdo con la planificación general por hitos.

El programa maestro o planificación inicial debe ser desarrollado con información que represente el verdadero desempeño que posee la empresa en obra, sólo de esta manera se podrá dar validez a las planificaciones detalladas a corto plazo, mencionadas antes.

5.6.2. Planificación anticipada de recursos (Look Ahead Planning - LAP)

La planificación anticipada de recursos o también llamada planificación intermedia esta diseñada para prever con una adecuada anticipación los requerimientos de materiales, mano de obra, equipo, financiamiento e información, de forma que la planificación de corto plazo se haga en función de actividades que son posibles.³³

El criterio de posibilidad se establece a partir de que dichas actividades cuenten con todos requerimientos necesarios para lograr un escudo sobre la producción de 3-5 semanas de anticipación (dependiendo del tipo de obra y del tipo de fabricación de ciertos materiales y equipos).³⁴

Así se logra tomar el control, de forma anticipada, de factores que externos o internos afectan la producción generando variabilidad y bajas en la eficiencia y productividad del sistema.

³² Virgilio Ghio Castillo; Productividad en Obras de Construcción, Diagnóstico, crítica y propuesta, Pág. 109.

³³ Herman Glenn Ballard; The Last Planner system of production Control (Thesis submitted to the Faculty of Engineering of The University of Birmingham for the degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY), Capítulo 3, Pág. 5, 6, 7.

³⁴ Virgilio Ghio Castillo; Productividad en Obras de Construcción, Diagnóstico, crítica y propuesta, Pág. 113 114.

Antes de entrar a la ventana de tiempo de la planificación LAP, el programa maestro de actividades es dividido en niveles de detalle (WBS), apropiados para la asignación del plan de trabajo semanal en el cual típicamente se rinden múltiples asignaciones para cada actividad.³⁵

Cada asignación esta sujeta a un análisis de restricciones para determinar lo que debe ser hecho de tal forma que la actividad quede lista para ser ejecutada. Solo aquellas actividades que pueden ser realizables entran a la ventana del LAP, las que aun tienen restricciones se convierten en asignaciones potenciales y son retardadas, colocándolas en la ultima semana de ejecución del LAP. Luego se mueven semana a semana hasta que les este permitido ingresar al ITE (Inventario de Trabajo Ejecutable), pero solo si todas las restricciones han sido removidas y se encuentran en una secuencia apropiada de ejecución.³⁶

Los planes de trabajo semanal son formados desde el ITE, mejorando así la productividad de quienes reciben estas asignaciones e incrementando la confiabilidad del flujo de trabajo para la siguiente unidad de producción.

Análisis de restricciones

Una vez que las asignaciones son identificadas e ingresadas en la planificación LAP, estarán sujetas al análisis de restricciones.

Estas restricciones pueden ser: contrato, diseño, materiales, prerequisites de trabajo, espacio, equipos, mano de obra, y además una categoría ampliable para otras restricciones, las que podrían incluir permisos, inspecciones, aprobaciones, etc.

El análisis de restricciones involucra dos procesos clave para poder liberar las restricciones, estos son: Revisión de restricciones y Preparación de las restricciones.³⁷

³⁵ Herman Glenn Ballard; The Last Planner system of production Control (Thesis submitted to the Faculty of Engineering of The University of Birmingham for the degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY, Capítulo 3, Pág. 6, 7.

³⁶ Herman Glenn Ballard; The Last Planner system of production Control (Thesis submitted to the Faculty of Engineering of The University of Birmingham for the degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY), Capítulo 3, Pág. 7, 8.

³⁷ Herman Glenn Ballard, The Last Planner system of production Control (Thesis submitted to the Faculty of Engineering of The University of Birmingham for the degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY, Capítulo 3, Pág. 9

La revisión consiste en determinar el estado de las tareas en la planificación intermedia, en relación con sus restricciones y a la probabilidad de removerlas antes del comienzo programado de la actividad, a partir de lo cual se puede escoger adelantarlas o retardarlas con respecto al programa maestro. Esto se repite en cada ciclo de planificación, cuando el planificador actualiza la planificación LAP y se adelanta para la próxima semana. (Ver figura 5.6)

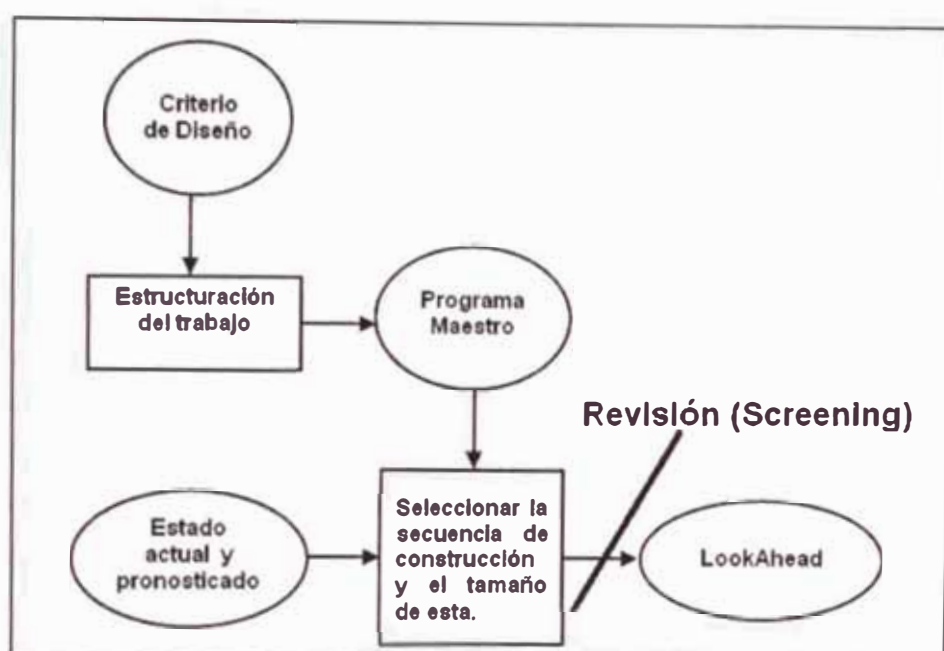


Figura 5.6: Revisión de actividades antes de la Planificación Anticipada de recursos (Look Ahead Planning – LAP)

Preparación de restricciones, se refiere a tomar las acciones necesarias para remover las restricciones.

La preparación es un proceso que tiene 3 pasos:

Confirmar el “tiempo de respuesta”. El remover una restricción de una actividad comienza por determinar quien es el último involucrado en liberar la última restricción faltante de esa actividad y determinar cual es el tiempo de respuesta más probable para comenzar la siguiente actividad.³⁸

Arrastrar, que significa pedirle al proveedor certeza sobre las necesidades para completar con prontitud la actividad que comienza.

³⁸ Raúl Rojas Vera; La Construcción, Pág. 28, 29 y 30.

Apresurar, si el periodo de respuesta anticipado es demasiado largo, entonces puede ser necesario asignar recursos adicionales para acortarlo y liberar la tarea.

Una vez concluido lo anterior, estamos en condiciones de crear un listado de tareas que tienen alta probabilidad de ser cumplidas, el inventario de trabajo realizable (ITE).³⁹

5.6.3. Trenes de Trabajo

Es una herramienta para administrar actividades repetitivas y secuenciales, tales como montajes, estructuras de edificaciones, tendido de tuberías, etc.

La programación lineal, a diferencia de otras técnicas de programación como el CPM (critical path method), esta basada en partir los volúmenes de trabajo en porciones más pequeñas, más manejables para lograr volúmenes de producción similares cada día, en cada cuadrilla.⁴⁰

La programación de cada actividad se logra mediante el balance de la capacidad de las cuadrillas y recursos asignados a cada actividad.

Las actividades dentro de un Tren de Trabajo van conectadas una detrás de otra, generando una relación de dependencia que al no contar con holguras convierten a todas las actividades del tren en críticas, eliminando tiempo muertos pero existiendo el riesgo que el retraso en una actividad genere atraso en el resto de actividades.

Pasos a seguir para generar un Tren de Trabajo

1. Sectorizar el área de trabajo en áreas pequeñas para aprovechar la curva de aprendizaje.
2. Listar las actividades necesarias, las que pueden ser tomadas de la Programación Anticipada de Recursos (LAP).
3. Secuenciar las actividades (incluir colchones de tiempo de ser necesarios).

³⁹ Raúl Rojas Vera; La Construcción, Pág. 28, 29 y 30.

⁴⁰ Virgilio Ghio Castillo; Productividad en Obras de Construcción, Diagnóstico, crítica y propuesta, Pág. 115-118.

4. Dimensionar recursos, para ello la cantidad de trabajo debe ser equivalente entre sí en cada sector. Es decir, todas las cuadrillas deben estar balanceadas para avanzar diariamente el mismo metrado, sin holguras o pérdidas.⁴¹

5.6.4. Planificación Semanal

Es una planificación detallada de las actividades que se realizarán durante la siguiente semana, tomando en consideración el avance real de la obra. Debe ser realizado por administradores de obra, supervisores de terreno, capataces u otras personas que supervisan directamente la ejecución del trabajo.

El Plan de trabajo semanal es una selección de tareas que se encuentran dentro del ITE, organizadas secuencialmente de la mejor forma para cumplir con los objetivos del proyecto. Es decir, son "asignaciones de calidad", que han levantado sus restricciones, lo que protege el flujo de producción de incertidumbres, creando un flujo de trabajo confiable para la unidad de producción que ejecutara el plan de trabajo semanal.⁴²

Los planes de trabajo semanal son efectivos cuando las asignaciones cumplen con los cinco criterios de calidad.

1. Definición, las actividades deben ser lo suficientemente específicas para que pueda recolectarse el tipo y cantidad correcta de información o materiales.
2. Consistencia, todas las actividades deben ser ejecutables, es decir, todos los trabajos pré requeridos deben haber sido completados.
3. Secuencia, la selección de asignaciones debe ser hecha sobre la base de la secuencia provista por la red inicial CPM inicial, en orden de prioridad y constructabilidad. Debe también existir tareas de calidad para suplir a otras en caso de fallar la productividad o exceder las expectativas.
4. Tamaño, los tamaños de las asignaciones deben haber sido determinados según la capacidad individual o grupal de las unidades de producción, antes de comenzar el periodo de ejecución.

⁴¹ Graña y Montero; Curso de Programación, Productividad y Control de Obra, Pág. 30, 31.

⁴² Raúl Rojas Vera, La Construcción, Pág. 30-34.

5. Retroalimentación o aprendizaje, a través de la identificación de las causas de no cumplimiento y de las acciones correctivas a tomar a las acciones que no fueron completadas en la semana.⁴³

Análisis de confiabilidad

El análisis de confiabilidad evalúa hasta que punto la programación “sin pérdida”, fue capaz de anticiparse al trabajo que se haría en la semana siguiente. Es decir, compara lo que sería hecho según el plan de trabajo semanal con lo que realmente fue hecho, reflejando así la fiabilidad del sistema de planificación. (Ver figura 5.7)

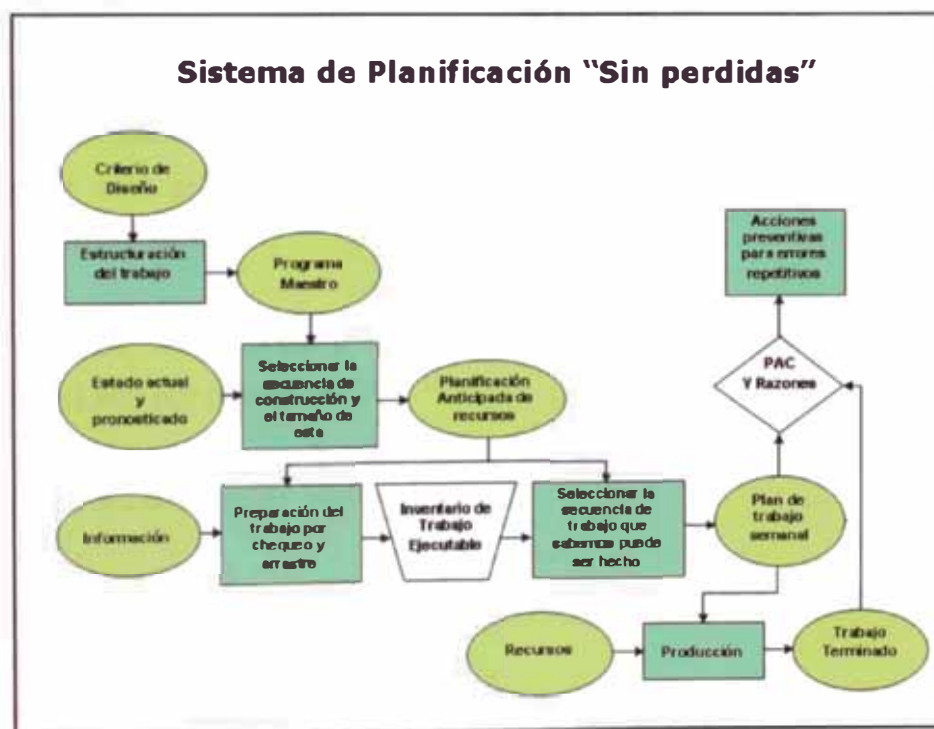


Figura 5. 7: Sistema de Planificación "Sin Perdidas" como un todo.

Esta medición se basa en el Porcentaje del Plan Completado (PPC), el que se calcula dividiendo el número de tareas completadas entre el número total de tareas programadas, donde solo se consideran las tareas 100% completadas y no se considera el avance parcial, debido a que no se trata de

⁴³ Raúl Rojas Vera, La Construcción, Pág. 31

medir el avance, sino la confiabilidad y efectividad del sistema de programación.⁴⁴

Además, se genera un registro estadístico de las razones por las cuales no han sido cumplidas ciertas tareas planificadas, para poder atacar las causas del problema, se hace uso de herramientas de calidad y productividad, que permitan eliminarlas de raíz.

5.6.5. Planificación Diaria

El sistema propuesto incluye la utilización de planificaciones diarias, las cuales están diseñadas para balancear la capacidad real de producción de las cuadrillas existentes, respecto a la cantidad de trabajo que se les asigna.

Por lo general, los maestros y capataces son juzgados por los plazos de ejecución y la calidad de su trabajo, esto se debe a que no cuentan con las herramientas o la información suficiente para obtener dichas metas con la máxima eficiencia posible

Esta es una de las razones por las cuales se obtienen niveles de TP en promedio en Lima por debajo del 28%.⁴⁵

Por tal razón, la planificación diaria debe incluir:

1. Todas las actividades que se realizaran durante el día, con el responsable de cada cuadrilla.
2. El número de obrero de cada cuadrilla básica así como el número de cuadrillas básicas.
3. El metrado de cada actividad que se realizará.
4. La velocidad de producción de cada cuadrilla.
5. A partir de los valores anteriores, se calcula el rendimiento para cada actividad.⁴⁶

⁴⁴ Graña y Montero; Curso de Programación, Productividad y Control de Obra, Pág. 25, 26.

⁴⁵ Virgilio Ghio Castillo; Productividad en Obras de Construcción, Diagnóstico, crítica y propuesta, Pág. 124, 125.

⁴⁶ Virgilio Ghio Castillo; Productividad en Obras de Construcción, Diagnóstico, crítica y propuesta, Pág. 124, 125.

Adjunto al cuadro de planificación diaria se incluye una columna que mide el porcentaje de cumplimiento de cada actividad en el día.

Debajo del cuadro se colocan los resúmenes de los metrados y los rendimientos para actividad mayor, tanto lo proyectado como lo realmente ejecutado.

CAPÍTULO VI

CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS DEL PROYECTO INTERCEPTOR NORTE

6.1. ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO

6.1.1. Objetivo del proyecto

La ejecución del Interceptor Norte tiene como finalidad eliminar los puntos de lanzamientos de desagües crudos al mar, cursos de agua o usos agrícolas con desagües crudos, con la interceptación de ocho colectores primarios y transportarlos hasta la playa Taboada, zona en la que se ubicará la futura planta de tratamiento previa al lanzamiento submarino de los desagües al mar.

Cuatro de estos colectores serán interceptados en la parte alta, a la izquierda del río Rímac y los otros cuatro en la parte baja a la derecha del río. La división obedece a condiciones topográficas y urbanísticas, ya que la parte alta tiene una topografía irregular y la parte baja es uniforme y está conformada por áreas agrícolas, el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez y termina en la zona costera.

Seis de estos ocho colectores son interceptados en la línea del interceptor. Las dos restantes llegan directamente a la playa Taboada a través de derivaciones que son obras de este proyecto.

La interceptación se inicia en el colector Costanero (\varnothing 1500 mm) con una cámara interceptora de dos compuertas para desviar el desagüe al mar en caso de emergencia.

El segundo punto de interceptación ocurre con la derivación del colector La Marina (\varnothing 1100 mm), en el cruce de las avenidas La Marina e Insurgentes. Luego el interceptor captará los desagües del colector 10 (\varnothing 1200 mm) y el 19 (\varnothing 1350 mm), en las avenidas Argentina y Morales Duárez, respectivamente.

Aquí termina la construcción de la parte alta con el tendido de tuberías de 2.8 kilómetros usando el método Pipe Jacking o hincado de tuberías.

A partir de aquí el interceptor cruzará el río Rímac por debajo de su lecho y se inicia la parte baja del interceptor. El trazo original, dentro del Aeropuerto Internacional Jorge Chávez, fue cambiado por uno paralelo.

A la altura del aeropuerto son interceptados los colectores 6 y Bocanegra; este será reubicado en la avenida Elmer Faucett para evitar el tramo que pasa por el aeropuerto, muy cerca de la superficie. La intercepción con el colector 6 es particularmente importante, pues aquí se instalará una compuerta para proteger el aeropuerto.

El colector Centenario, que actualmente descarga al mar, llegará a la cámara de rejillas en la estación de bombeo Sarita Colonia, y de allí, a través de la línea de impulsión del mismo nombre, hasta la playa Taboada.

El colector Comas Chillón llega a la cámara de rejillas de la playa Taboada a través de una derivación.

En la playa Taboada se reúnen el interceptor, la derivación de Comas-Chillón y la línea de impulsión Sarita Colonia.

6.1.2. Ubicación

El proyecto se encuentra ubicado en el departamento de Lima y atraviesa los distritos de San Miguel, La Perla, Bellavista, y Callao. (Ver figura 6.1)

El Proyecto se inicia entre la Av. La Paz y la Calle 2 de Mayo, continuando por las siguientes vías y lugares: Av. Libertad, Av. De los Insurgentes, Av. Del Pescador, Av. Comandante Pérez Salmón, Av. Argentina, Av. Alameda, Bordeando la espalda del Aeropuerto hasta el Óvalo 200 Millas, Av. Centenario, Av. Prolongación Centenario, AAHH. Sarita Colonia.

6.1.3. Plazo de ejecución: Julio del 2004 a diciembre 2006 (2 años)

6.1.4. Monto de la obra: \$ 140 910 395 (no incluye IGV)

6.1.5. Concedente: Sedapal- Lima

6.1.6. Supervisión: Asociación Hask- Alpha Consult

6.1.7. Contratista: Consorcio Colectores del Callao (ODEBRECHT – MINERA
SAN MARTIN)



Figura 6.1: Ubicación del proyecto "Interceptor Norte" en el Departamento de Lima

6.2. DESCRIPCIÓN DE LA OBRA

6.2.1. Interceptor Norte - Parte alta

Los colectores que drenarán al Interceptor Norte en su Parte Alta son: Costanero, La Marina, N° 10 – Argentina y N° 19 – Morales Duárez.

En la zona denominada Parte Alta se instalará: tubería de dos (2) diámetros: 1500 mm y 2100 mm, el material de la tubería es de concreto reforzado con un revestimiento interior de polietileno de alta densidad (HDPE).

Se han adoptado dos procedimientos constructivos para la instalación:

1. **Procedimiento convencional** que consiste en la excavación de zanjas a cielo abierto con retroexcavadora seguido del tendido de tuberías en dichas zanjas.
2. **Procedimiento no convencional** que consiste en la excavación de un túnel y la extracción del material excavado por el interior de la tubería, al mismo

tiempo que se va empujando la línea de tubería instalada, mediante cilindros hidráulicos de tamaño y potencia adecuados.

A lo largo del Interceptor (Parte Alta) se tiene elementos de inspección e interceptación que en casos de colectores de menor magnitud se denominarían buzones, sin embargo, dado a la envergadura del presente proyecto a estos elementos se les denominará CÁMARAS. Son un total de 36 cámaras, 32 especiales y 4 interceptoras. (Ver tabla 6.1 y 6.2)

Tabla 6.1: Metrado de instalación de tuberías por métodos constructivos				
Tramo	Material	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Método Constructivo
CC al C-7	Concreto Reforzado	1500	684	Zanja Abierta
C-7 al C-9A	Concreto Reforzado	2100	432	<i>Pipe Jacking</i>
C-9A al C-13	Concreto Reforzado	2100	528	Zanja Abierta
C-13 al C-22	Concreto Reforzado	2100	1572	<i>Pipe Jacking</i>
C-22 al C-27	Concreto Reforzado	2100	349	Zanja Abierta
C-27 al C-31	Concreto Reforzado	2100	714	<i>Pipe Jacking</i>
C-31 al C-34	Concreto Reforzado	2100	486	Zanja Abierta
TOTAL			4765	-

Tabla 6.2: Resumen de instalación de tubería por método constructivo			
Método Constructivo	Diámetro (mm)	Longitud Parcial (m)	Longitud Total (m)
Zanja Abierta	1500	684	2047
	2100	1363	
Pipe Jacking (Túnel)	2100	2718	2718
TOTAL			4765

6.2.2. Interceptor Norte - Parte baja

A continuación se describe el sistema de colectores que drenarán al "Interceptor Norte" en su Parte Baja.

El trazo inicia su recorrido captando el aporte del colector N° 19 en el cruce con la Av. Morales Duárez (empalmado a la tubería existente de 1350 mm en

funcionamiento), cruza el río Rímac e intercepta al colector N° 6 en la cámara C-37.

A lo largo del Interceptor (Parte Baja) se tienen un total de 35 cámaras y 33 cámaras especiales. (Ver tabla 6.3)

Aproximadamente en la progresiva 10+107 interceptará al colector Bocanegra, con la intersección de la derivación de dicho colector, se eliminará el lanzamiento de los desagües crudos al mar, así como su utilización en usos agrícolas.

Tabla 6.3: Metrados de instalación de tubería por método constructivo				
Tramo	Material	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Método Constructivo
C-34 al C-37	Concreto Reforzado	2100	437	Zanja Abierta
C-37 al C-59	Concreto Reforzado	2400	4,905	Zanja Abierta
C-59 al Canal	Concreto Reforzado	2400	855	Zanja Abierta
TOTAL			6,197	-

6.2.3. Estación de bombeo Sarita Colonia

La estación de bombeo se ubica en la Av. Prolongación Centenario en el AAHH Acapulco, Distrito y Provincia del Callao. Esta ubicación obedece a mejores condiciones del suelo ya que en la mayor parte de esta zona éste no es el más adecuado para la construcción de estructuras.

La estación de bombeo Sarita Colonia atenderá el área de drenaje 5 (Centenario), la cual tiene un caudal promedio diario de 0.944 m³/s y un máximo horario de 1.473 m³/s. Para reunir y conducir dicho caudal a la estación de bombeo se construirá e instalará una cámara de captación de 3.80 m x 5.45 m y una tubería de concreto de Ø1200 mm y 63.60 m de longitud, respectivamente.

El terreno donde se ubicará la estación cuenta con aproximadamente 1710 m², la cual tiene los siguientes componentes: Cámara de rejillas, Cámara de bombeo, Caseta de operación, Casetas para subestación eléctrica y grupo electrógeno, Cerco perimetrico, caseta y torreones de seguridad, Patio de maniobras.

6.2.4. Línea de impulsión Sarita Colonia

La línea de impulsión se inicia en la estación de bombeo Sarita Colonia, recorre la Av. Prolongación Centenario de Sur a Norte hasta llegar a la cámara de rejillas Taboada, en el Callao. La obra consiste en la instalación de 2,711 m de tubería de hierro fundido dúctil (HFD), clase K7 de 1000 mm de diámetro, revestida interiormente con cemento aluminoso. Asimismo, de acuerdo con estudio de suelos, las tuberías, válvulas y accesorios de hierro dúctil deberán proteger con una manga de polietileno y pinturas especiales.

6.2.5. Cámara de rejillas Taboada

Se sitúa en los terrenos de Sedapal ubicados en la playa Taboada al Norte del Ex - Fundo San Agustín en la Provincia Constitucional del Callao.

Cabe señalar que esta cámara no es el tratamiento definitivo que convenga a las aguas servidas que se verterán al mar, constituye un tratamiento preliminar como parte de la solución integral del sistema de recolección de aguas servidas de Lima Norte, el cual incluye una planta de tratamiento y un emisor submarino.

Los componentes de la cámara de rejillas son: rejillas, cerco perimetrico, almacén, oficinas, caseta de vigilancia y servicios.

6.2.6. Derivación del colector La Marina

Esta obra permitirá desviar los desagües del colector existente, desde el cruce del Psje. Rázuri con la Av. La Marina hasta empalmar con el Interceptor Norte en la cámara C-9.

Desde este cruce, recorrerá la Av. La Marina hasta llegar al cruce con la Av. Los Insurgentes (cámara interceptora C-9), transportando un caudal máximo de 2.561m³/s. Para ello se instalarán 743 m de tubería de concreto reforzado de diámetro 1100 mm con revestimiento interno de HDPE. En su recorrido interceptará al colector Cañamelares de 400 mm de diámetro.

6.2.7. Rebose de emergencia

Este sistema de emergencia consiste en derivar los desagües (10.418 m³/s) a través de una cámara especial (cámara C-35) ubicada en la margen derecha del

río Rímac a la altura de la Av. Circunvalación, haciendo un recorrido de 591 m paralelo al muro de contención existente; para finalmente descargar las aguas servidas sobre el propio río, antes de su paso por el aeropuerto.

El material a emplear en la línea del rebose de emergencia será de concreto armado, con un revestimiento interior de polietileno de alta densidad (HPDE) y será instalada mediante la técnica de zanja abierta con entibado.

6.2.8. Derivación del colector Bocanegra

Actualmente el colector Bocanegra cruza las instalaciones del Grupo Aéreo N° 8 de propiedad de la Fuerza Aérea del Perú y terrenos de cultivo de propiedad privada. Se ha proyectado derivar al colector Bocanegra, siendo su nuevo recorrido por la Av. Elmer Faucett con dirección norte, captará el colector San Juan Masías y descargará al Interceptor Norte en la cámara C-59 un caudal máximo de 0.29 m³/s. La obra consiste en la instalación de aproximadamente 1630 metros de tubería de PVC ISO serie 20 de 630 mm diámetro y la construcción de 17 buzones Tipo II.

6.2.9. Colector Juan Pablo II

El colector Juan Pablo II se inicia frente a la actual cámara de bombeo de Juan Pablo II en la Av. El Emisor, continua hasta la Av. Manuel Seoane, sigue por la Calle Acapulco y finalmente descarga al nuevo colector Centenario en la Av. José Gálvez. Para su instalación se requerirá la derivación de redes secundarias de desagüe de DN 200 mm. Se instalarán tuberías de PVC ISO de DN 200 mm y 315 mm serie 25, DN 400 mm serie 20, mediante la técnica de zanja abierta con entibado y bombeo para deprimir el nivel freático presente en toda la zona de trabajo.

6.2.10. Derivación del colector Comas-Chillón

En la actualidad los colectores son de tubería de concreto reforzado: Comas de 1500 mm y Chillón de 1400 mm de diámetro. Ambos recorren en forma paralela por la Av. Prolongación Izaguirre hasta descargar en la playa Taboada. La presente obra cambiará el recorrido mencionado, derivando el colector Comas Chillón a partir de la cámara existente ubicada en la Av. Prolongación Izaguirre,

el cual cruzará terrenos agrícolas y continuará por la calle N° 8 hasta doblar por el pasaje Virgen del Carmen; luego ingresará por la Av. Centenario hasta los terrenos de SEDAPAL en la playa Taboada. Captará los desagües del área de drenaje 8, el cual comprende gran parte de la zona Norte de Lima, siendo su caudal máximo recolectado de 5.668 m³/s.

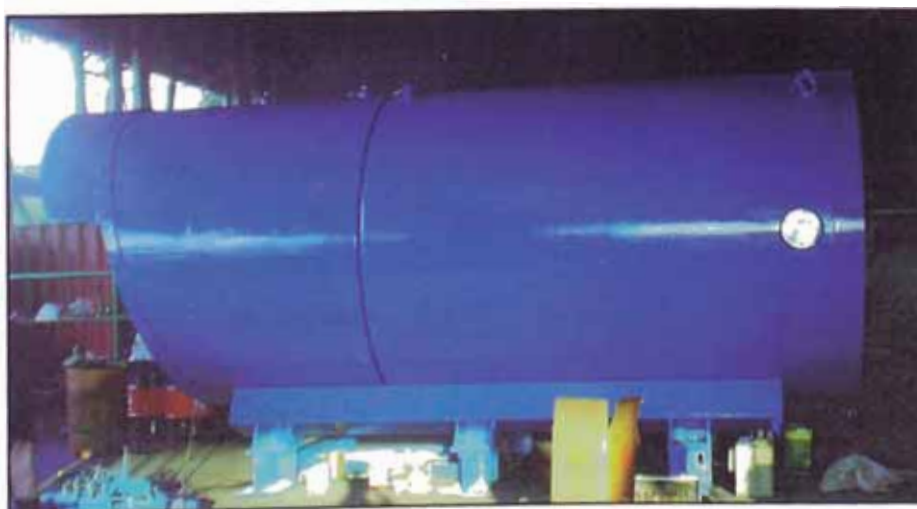
La obra consiste en la instalación de tuberías de concreto reforzado clase I de 2400 mm de diámetro recubiertas interiormente con polietileno de alta densidad, con una longitud aproximada de 935 m y la construcción de 8 buzones o cámaras.

6.3. SISTEMA “PIPE JACKING” O “HINCADO DE TUBOS”

El método Pipe Jacking forma parte del sistema TRENCHLESS, que significa sin zanja, basada en la instalación de ductos directamente al terreno donde descansará la tubería.

El término Pipe Jacking es usado para describir un método de instalación de tuberías, así como también es un concepto usado para un rango de instalación tuberías de tuberías de 1500 mm – 2600 mm dentro del sistema Trenchless.

El método Pipe Jacking consiste en la colocación de tubos que son introducidos longitudinalmente, siendo empujados por un sistema de cilindros hidráulicos especiales. (Ver fotografía 6.1)



Fotografía 6.1: Shiel de 2500 mm de diámetro y 5.92 m de longitud con Escudo de frente abiert.

Una característica principal del método es que no requiere una abertura de la vía para la colocación de los tubos. Las perturbaciones de las excavaciones en la superficie se limitan al área correspondiente a cada Pozo de Empuje o Pozo de Salida.¹

El equipo "Pipe Jacking" está compuesto en este caso:

6.3.1. Shield de frente Abierta

Corona Cortante o Zapata de Corte

La Corona Cortante (Ver fotografía 6.2) sirve para el guiado de la máquina, su filo cuneiforme se mete a presión en el terreno existente y puede ajustarse para el mantenimiento de la dirección de avance tanto horizontal y vertical del tramo de tuberías² por medio del Bloque direccional de la Corona Cortante (Ver fotografía 6.3) y guiado por el láser.



Fotografía 6.2: Corona cortante

El bloque direccional está compuesto por una válvula que permite el ingreso del aceite hidráulico al sistema, un manómetro que registra la presión de ingreso del fluido y cuatro grupos de dos válvulas con su respectivo manómetro que registra la presión del bloque de cilindros que está a su mando. Cada par de válvulas se encarga del estiramiento o contracción de un grupo de tres cilindros hidráulicos, que se encuentran

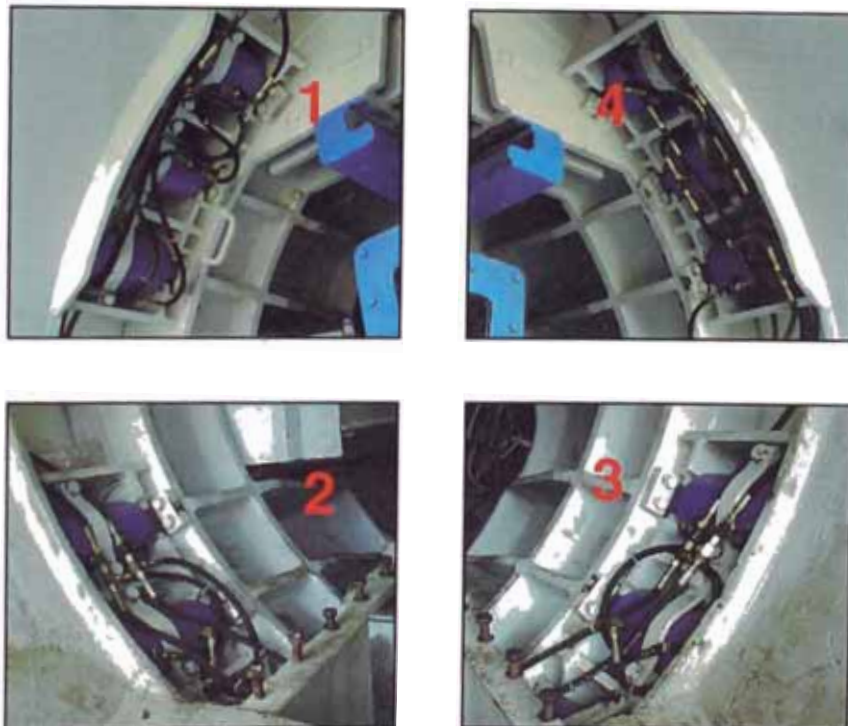
¹ Fernández Ruiz, Inácio; Proyecto Colector Vía del mar, Pág. 33

² Westfalia Becorit – Industrietechnik GmbH; Manual de servicio de Instalación de avance a presión de tubos, Pág. 19

en relación con articulados en relación con la coraza metálica de trabajo³.
(Ver fotografía 6.4)



Fotografía 6.3: Bloque direccional de Corona cortante



Fotografía 6.4: Cilindros hidráulicos distribuidos en 4 grupos de tres cilindros Hidráulicos cada uno.

Los cilindros hidráulicos pueden ser adaptados para el trabajo de simple o doble efecto y cumplen con las siguientes características:

³ Fernández Ruiz, Inácio; Proyecto Colector Viña del mar, Pág. 34

Presión Máxima	60	Bar
Fuerza de compresión generada por una presión de 60 bar.	72.2	KN
Fuerza de tracción generada por una presión de 60 bar.	26.0	KN
Diámetro de émbolo	125	mm
Diámetro del vástago del émbolo	100	mm
Carrera	100	mm

El láser (Ver fotografía 6.5) es el que guía del recorrido según la pendiente definida para el tramo de tuberías a instalar, el equipo es alojado en un pórtico en el pozo de empuje (Ver fotografía 6.6). Su señal viaja a lo largo de todo el tramo de tuberías y pasa por un canal dentro de la máquina llegando hasta al bull que se encuentra a 800 mm del eje de la máquina. (Ver fotografía 6.7)



Fotografía 6.5: Láser.



Fotografía 6.6: Láser alojado en el pórtico.

El láser es elegido de acuerdo con los metros de tubería a colocar, de tal forma que la señal llegue claramente al bull.

El bull se aloja sobre una base niveladora, su diseño depende de los límites establecidos en el proyecto, en este caso es de 7.5 mm en la horizontal y 4.0 mm en la vertical. (Ver fotografía 6.8)



Fotografía 6.7: Canal por donde viaja el láser hasta llegar al bull.



Fotografía 6.8: Bull donde llega la señal del láser.

Retroexcavadora Z3

La retroexcavadora es una máquina apropiada para excavar galerías con diámetros nominales de 1400 mm hasta 2800 mm

La retroexcavadora tiene una pluma telescópica con una cuchara de excavación y carga para permitir el tendido de tuberías en forma de construcción subterránea, en particular aplicando el método de avance a presión.⁴

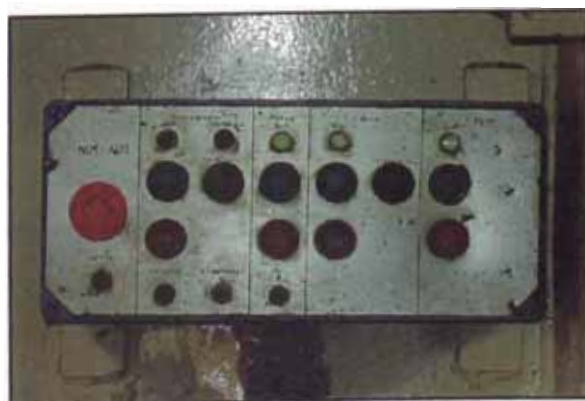
⁴ Westfalia Becorit – Industrietechnik GmbH; Manual de servicio de la Retroexcavadora Z3. Pág. 16

El aparato está debajo de un carro desplazable longitudinalmente por medio de cilindros hidráulicos, de ese modo puede desplazarse a la posición más deseada. El carro va alojado en una guía, que está fija por medio de un riel en el techo del tubo de trabajo.⁵

El material desprendido por la cuchara se lleva con ayuda del conjunto telescópico sobre la faja primaria y después a la faja secundaria. El movimiento horizontal y vertical de la retroexcavadora permite una realización exacta del perfil de excavación. Todos los movimientos se realizan a través de palancas de control o llamado JOYSTICKS (Ver fotografía 6.9) y unas bombas hidráulicas activadas a través de un Panel de control (Ver fotografía 6.10) además de utilizarse aceite mineral o líquidos biodegradables como elementos de presión.



Fotografía 6.9: Joysticks o Palancas de Control de la retroexcavadora



Fotografía 6.10: Panel de control

⁵ Westfalia Becorit – Industrietechnik GmbH: Manual de servicio de la Retroexcavadora Z3, Pág. 16

A su vez la Retroexcavadora está compuesta principalmente de: (Ver figura 6.2)

1. Carro
2. Soporte Giratorio
3. Brazo Retroexcavador
4. Cuchara
5. Cilindro de avance / Carro
6. Cilindros Giratorios / Soporte Giratorio
7. Cilindros Elevadores
8. Cilindro / Hoja de Cuchara

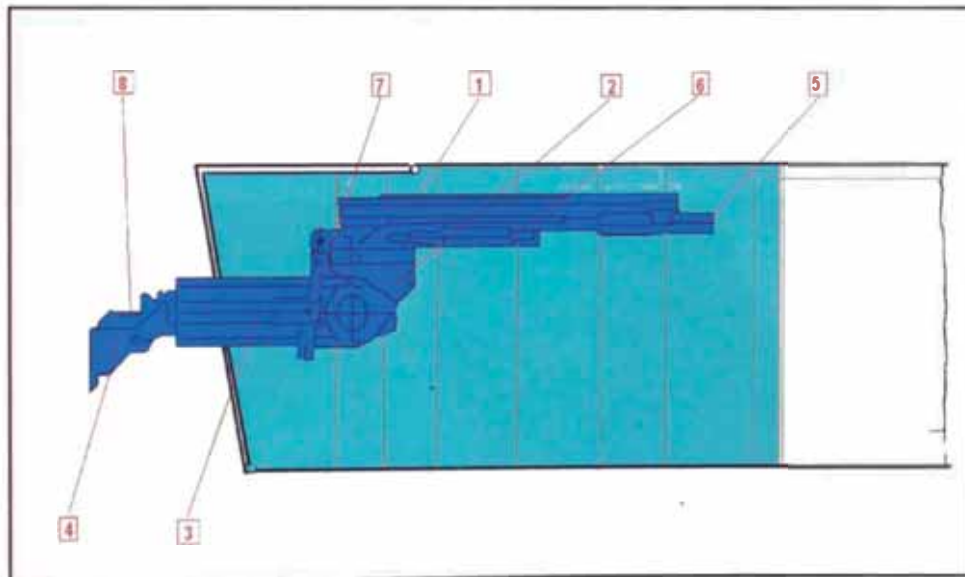


Figura 6.2: Partes de una Retroexcavadora

1. **Carro:** Soportal dispositivo de corte de la máquina. El carro está unido al soporte giratorio a través de una unión giratoria y es desplazable longitudinalmente con un cilindro hidráulico, a su vez el carro va alojado en la guía del carro o suspensión, que está⁶ soldada en el techo de un tubo metálico de trabajo.⁷ (Ver fotografía 6.11)

⁶ Westfalia Becorit – Industrietechnik GmbH; Manual de servicio de la Retroexcavadora Z3, Pág. 18

⁷ Westfalia Becorit – Industrietechnik GmbH; Manual de servicio de la Retroexcavadora Z3, Pág. 19



Fotografía 6.11: Carro

- 2. Soporte Giratorio:** Sirve de alojamiento para la máquina de arranque. Está unido con el carro de arrastre de fuerza a través de una unión giratoria. Hay dispuestos puntos de articulación para los dos cilindros elevadores y el cilindro giratorio.⁸ (Ver fotografía 6.12)



Fotografía 6.12: A lado izquierdo se observa Carro y a lado derecho está el Soporte Giratorio

- 3. Brazo Retroexcavador:** Está compuesta de una caja interior y una caja exterior, juntas permiten que la cuchara logre alcanzar su objetivo.

La caja interior sirve de soporte para la cuchara y es guiada en la caja exterior, está construido de hierro perfilado a prueba de torsión. La

⁸ Westfalia Becorit – Industrietechnik GmbH; Manual de servicio de la Retroexcavadora Z3, Pág. 17

estirada y retirada tiene lugar con un cilindro hidráulico⁹ cuyas características son las siguientes: (Ver fotografía 6.13)

Presión Máxima	200	Bar.
Fuerza de compresión generada por una presión de 200 bar.	124.8	KN
Fuerza de tracción generada por una presión de 200 bar.	49.3	KN
Diámetro de émbolo	90	mm
Diámetro del vástago del émbolo	70	mm
Carrera	800	mm



Fotografía 6.13: Caja Interior

La caja exterior es el soporte para la caja interior y para la cuchara, está alojada en el soporte giratorio y se inclina verticalmente por medio de cilindro hidráulicos. Esta constituida de un perfil hueco a prueba de torsión con sección rectangular.¹⁰ (Ver fotografía 6.14)

- 4. Cuchara:** Está fabricada de forma que el material desprendido pueda alimentar bien a las fajas. La cuchara puede ser equipada con dientes cambiables de horquilla y el filo cortante está dotado de material indesgastable. El movimiento de rodadura de la cuchara lo produce un cilindro hidráulico o cilindro de rodadura.¹¹ (Ver fotografía 6.15)

⁹ Westfalia Becorit – Industrietechnik GmbH; Manual de servicio de la Retroexcavadora Z3, Pág. 21

¹⁰ Westfalia Becorit – Industrietechnik GmbH; Manual de servicio de la Retroexcavadora Z3, Pág. 22

¹¹ Westfalia Becorit – Industrietechnik GmbH; Manual de servicio de la Retroexcavadora Z3, Pág. 20



Fotografía 6.14: Caja Exterior



Fotografía 6.15: Cuchara de la retroexcavadora

5. **Cilindro de avance / Carro:** Éste es un cilindro de doble efecto, se encuentra fija en la coraza metálica y permite el desplazamiento del carro y en consecuencia de la máquina a lo largo de todo el carril. (Ver fotografía 6.16)



Fotografía 6.16: Cilindro de Avance del Carro

El cilindro tiene las siguientes características:

Presión Máxima	200	Bar.
Fuerza de compresión generada por una presión de 200 bar.	186.4	KN
Fuerza de tracción generada por una presión de 200 bar.	87.8	KN
Diámetro de émbolo	110	mm
Diámetro del vástago del émbolo	80	mm
Carrera	1300	mm

- 6. Cilindros Giratorios / Soporte Giratorio:** Son de doble efecto y permiten movimientos en el plano horizontal, estos cilindros se encuentran unidos al riel del carro y al soporte giratorio por medio de pines. (Ver fotografía 6.17)

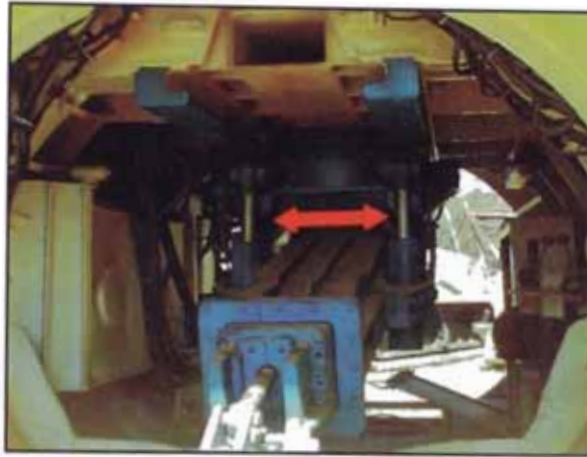


Fotografía 6.17: Cilindro Giratorio

Los cilindros tienen las siguientes características:

Presión Máxima	200	Bar.
Fuerza de compresión generada por una presión de 200 bar.	186.4	KN
Fuerza de tracción generada por una presión de 200 bar.	87.8	KN
Diámetro de émbolo	110	mm
Diámetro del vástago del émbolo	80	mm
Carrera	450	mm

- 7. Cilindros Elevadores:** Estos son cilindros de doble efecto y permiten movimiento en planos verticales. Se encuentran unidos al soporte giratorio y a la caja exterior del brazo retroexcavador. (Ver fotografía 6.18)



Fotografía 6.18: Cilindro Elevador

Los cilindros tienen las siguientes características:

Presión Máxima	200	Bar.
Fuerza de compresión generada por una presión de 200 bar.	186.4	KN
Fuerza de tracción generada por una presión de 200 bar.	125.3	KN
Diámetro de émbolo	110	mm
Diámetro del vástago del émbolo	63	mm
Carrera	375	mm

- 8. Cilindro / Hoja de Cuchara:** Este es un cilindro de doble efecto y permite el movimiento de la cuchara al rededor de su eje. (Ver fotografía 6.19)

El cilindro tiene las siguientes características:

Presión Máxima	200	Bar.
Fuerza de compresión generada por una presión de 200 bar.	61.1	KN

Fuerza de tracción generada por una presión de 200 bar.	36.5	KN
Diámetro de émbolo	63	mm
Diámetro del vástago del émbolo	40	mm
Carrera	350	mm



Fotografía 6.19: Cilindro de hoja de Cuchara

Campo de acción de la Retroexcavadora Z3 (Ver figura 6.3 y 6.4)

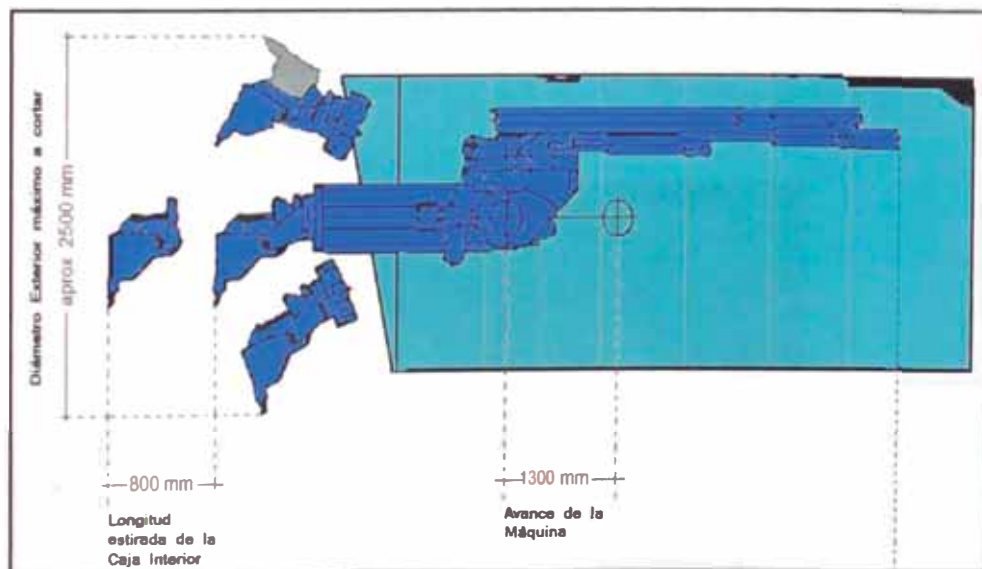


Figura 6.3: Alcance máximo de la Retroexcavadora en el eje vertical.

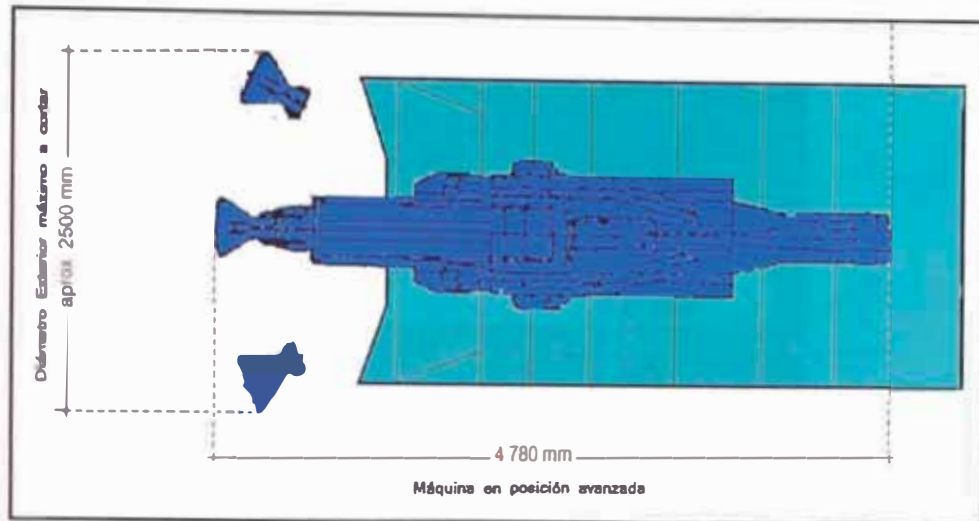
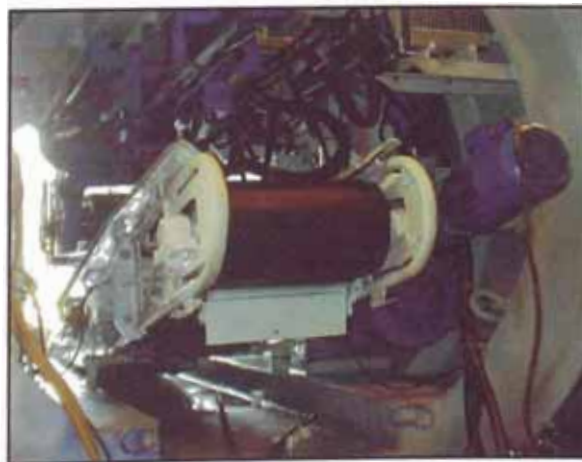


Figura 6.4: Alcance máximo de la Retroexcavadora en el eje horizontal.

Fajas Transportadoras

Las fajas transportadoras están montadas en serie, la faja primaria se encuentra montada en el Shield, específicamente de bajo de la retroexcavadora (Ver fotografía 6.20) y la faja secundaria es montada cuando el primer tubo ya está instalado. (Ver fotografía 6.21)

Las fajas funcionan con 4 KW de potencia y sus motores se encuentran en el extremo superior izquierdo, son encendidas mediante el panel de control; la primera faja puede ser accionada para un trabajo de ida y vuelta, mientras que la faja secundaria solo tiene un movimiento.



Fotografía 6.20: Faja Primaria



Fotografía 6.21: Faja Secundaria

Estación Principal

La estación principal es adecuada para todos los tipos de avance hidráulico de tubos en la construcción de tuberías, galerías y túneles, valiendo por igual para tubos de acero y hormigón.¹²

Una estación principal se compone principalmente de:

- 1. Anillo de Empuje o Anillo de Presión:** Es una estructura de acero encartelada interiormente, cuyo diseño depende del número de cilindros hidráulicos a utilizar, su función principal es distribuir equitativamente la fuerza transmitida por los 4 cilindros hidráulicos, primero al Shield y luego a la columna de tubos que serán colocados. (Ver fotografía 6.22 y figura 6.5)



Fotografía 6.22: Anillo de Empuje

¹² Fernández Ruiz, Inácio; Proyecto Colector Viña del mar, Pág. 35

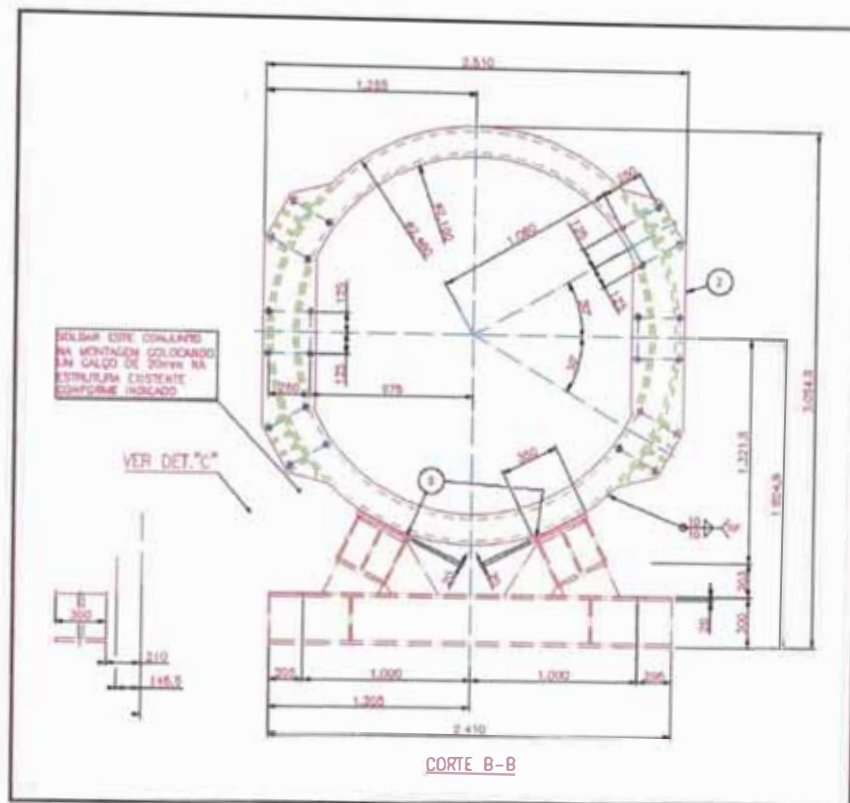


Figura 6.5: Anillo de Empuje

El anillo de empuje tiene como diámetro exterior 2460 mm y diámetro interior 2100 mm, su espesor es de 600 mm y pesa 3022 kg; detrás tiene una placa soldada de 65 mm de espesor, con un diámetro exterior ligeramente más grande que el anillo y cuatro áreas especiales de 310x310 mm en los que se encuentran las placas de apoyo de los cilindros hidráulicos.

- 2. Placa de reacción o Contrafuerte:** Es una placa de acero de 3200 mm de largo por 2560 mm de alto y 63.5 mm de espesor con un peso de 4088.7 kg.

La placa de reacción absorbe y transmite los esfuerzos generados por la fuerza hidráulica a un muro metálico de reacción; en ella también se encuentra alojado el protector metálico del láser. (Ver fotografía 6.23 y figura 6.6)



Fotografía 6.23: Anillo de Empuje, Placa de reacción y Muro metálico de reacción.

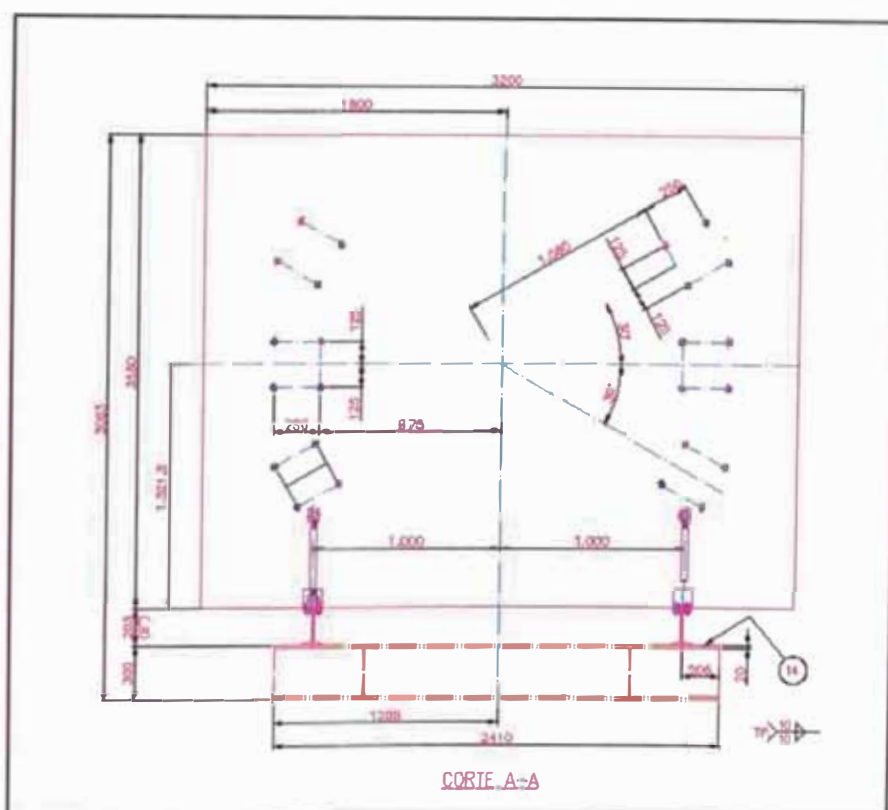


Figura 6.6: Placa de reacción

Detrás de la placa de reacción se encuentra un muro de reacción que es construido para facilitar una reacción en contra de cualquier cilindro hidráulico. En terrenos de baja capacidad portante, se tendrá que trabajar en capas para aumentar la capacidad de reacción del muro.

- 3. Cilindros de Empuje:** Las fuerzas sustanciales requeridas para el hincado de tuberías de concreto son proporcionadas por los cilindros hidráulicos de alta presión conducidos por el generador de energía eléctrica.

Los cilindros son hidráulicamente interconectados para asegurarse que la fuerza en cada uno sea la misma. El número de cilindros utilizados puede variar de acuerdo con el tamaño de la tubería, a su resistencia, a la longitud de tuberías a ser instalada y a la resistencia a la fricción (suelo-concreto). En este caso se usan cilindros telescópicos de doble efecto, lo que significa que lleva dos émbolos yuxtapuestos. Los cilindros están montados en voladizo y están articulados entre el anillo de empuje y el contrafuerte.

Sus bases de apoyo son de 310x310 mm y son equipadas con rótulas para asegurar que la plena transmisión de fuerza con apoyo siempre exacto tenga lugar sobre las superficies sometida a esfuerzo¹³, los pernos con los que son montadas las bases son de 30 mm de gran resistencia al corte y torción. (Ver fotografía 6.24)

En este caso se tiene cuatro cilindros hidráulicos, cada par de cilindros es opuesto diametralmente y forman un ángulo de 30° con la horizontal. (Ver figura 6.6)

Los cilindros cumplen en este caso con las siguientes características:

¹³ Westfalia Becorit – Industrietechnik GmbH; Manual de servicio de Instalación de avance a presión de tubos, Pág. 26

Presión Máxima	487.21	Bar.
Fuerza de compresión generada por una presión de 487.21 Bar.	2942	KN
Fuerza de tracción generada por una presión de 487.21 Bar.	597	KN
Diámetro de émbolo	280	mm
Diámetro del vástago del émbolo	250	mm
Carrera	2040	mm



Fotografía 6.24: Cilindros de Empuje

- 4. Rieles Guía o Base de apoyo de Shield:** Son dos estructuras de acero cuya función inicial es permitir el guiado y deslizamiento del Shield, el alineamiento de los cilindros hidráulicos de la Estación principal y finalmente el deslizamiento de los tubos de concreto armado.

El primer riel tiene un peso de 2823 kg, sus dimensiones son de 4100 mm de largo por 2500 mm de ancho y tiene cuatro niveladores de base; este riel es el que va a lado del anillo de emboque y es el que soporta la mayor parte de la carga de los tubos hasta ser hincados completamente.

El segundo riel tiene un peso de 4061 kg, sus dimensiones son 2850 mm de largo por 2500 mm de ancho y tiene seis niveladores de base.

Este se ubica detrás del primer riel y está unido a él por siete pernos de 1" a cada lado, estos pernos aseguran la correcta alineación del

conjunto; además tiene cinco aberturas por lado en la parte superior, que permite el trabajo con una viga metálica y tres cilindros hidráulicos al inicio de la excavación. (Ver fotografía 6.25)



Fotografía 6.25: Riel guía o Base de apoyo

Las bases nivelantes son las que permiten el correcto posicionamiento de los rieles en el plano correspondiente a la pendiente del tramo y están compuestas de una base circular unida a una trampa bipartida por medio de ocho pernos de 10 mm. Estos a su vez permiten el anclaje de un perno de 60 mm, por otro lado, la estructura se encuentra unida a las bases nivelantes por medio de un cuerpo roscante de 180 mm de diámetro que está soldada a una placa de 1"x170x240. (Ver fotografía 6.26 y figura 6.7)

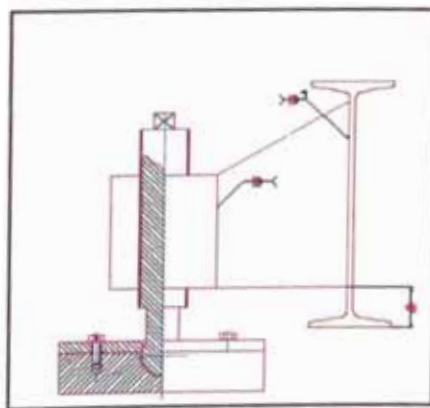


Figura 6.7: Nivelador de base



Fotografía 6.26: Nivelador de base

5. **Estación de bombeo Hidráulico de las Unidades de Empuje:** Es la unidad de abastecimiento de energía. El grupo básico se compone de: (Ver figura 6.8)

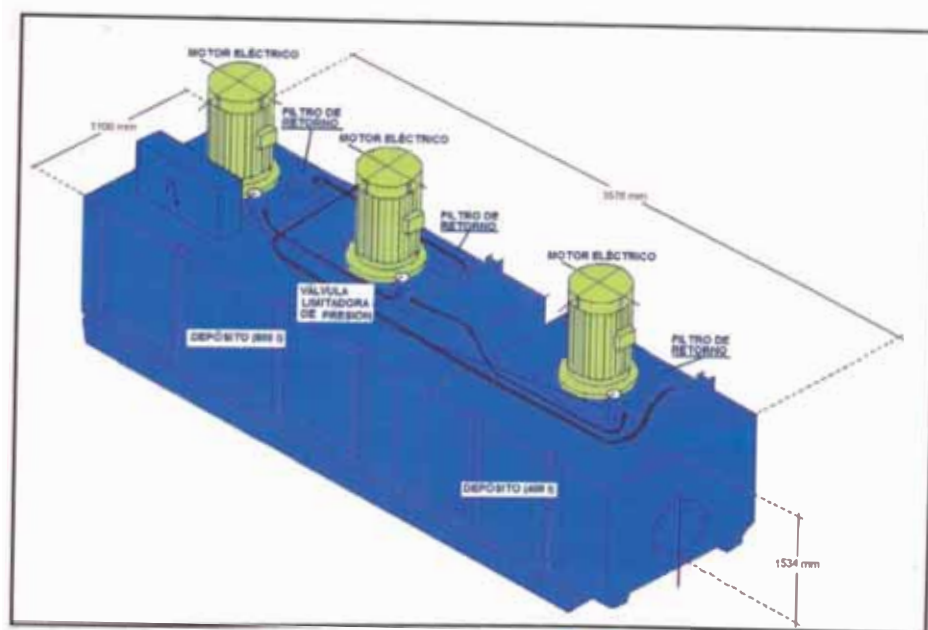


Figura 6.8: Estación de Bombeo Hidráulico

- ✓ Depósito
- ✓ Motor Eléctrico
- ✓ Bombas
- ✓ Válvula limitadora de presión
- ✓ Manómetro
- ✓ Filtro de retorno
- ✓ Contactor de nivel
- ✓ Válvula de antiretorno

Depósito: Éste se encarga de la recepción y almacenamiento del líquido hidráulico, disipa calor residual para que la temperatura del líquido descienda, separa aire, agua y sustancias sólidas y sirve de soporte para las bombas superpuestas, el motor y para otros elementos hidráulicos. En este caso se cuenta con dos depósitos conectados de 400 l y 800 l.

Motor Eléctrico: Los sistemas hidráulicos son accionados por motores, en este caso los motores se encuentran uno sobre el depósito de 400 l y dos sobre el depósito de 800 l, los motores son de 380 V, 50 Hz y 1500 rpm.

Bombas: Este se encarga de transformar la energía mecánica proveniente del equipo de accionamiento en energía hidráulica succionando el aceite y alimentando el sistema de tuberías. En este caso se tiene un grupo de bombas hidráulicas que está estructurado modularmente de manera que los grupos de bombas se pueden elegir conforme a la potencia de avance deseada, el número de los cilindros de avance empleado, así como también la potencia y el número de las estaciones intermedias a utilizar.¹⁴

Se dispone de etapas de bombas de caudales de 22, 44, 66 l/min a una presión permanente de 487.21 bares de cabina de llenado.

6. **Tablero Hidráulico:** Es un puesto de mando que está equipada con válvulas de vías robustas y sin fugas de aceite, así como también de todos los órganos de control necesarios y elementos de seguridad de presión para válvulas, cilindros hidráulicos y conducciones.¹⁵

Es de construcción modular, de manera que la construcción básica que comprende los cuatro cilindros de empuje a presión con sistema de accionamiento individual y total se puede ampliar cómodamente a seis.

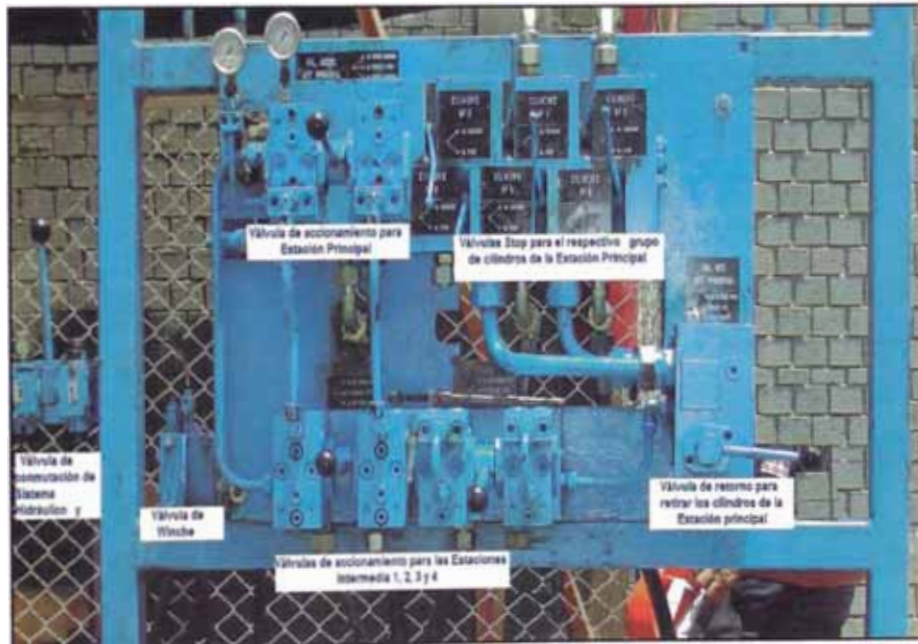
Este tablero es para el mando de la estación principal de cuatro cilindros hidráulicos, cuatro estaciones intermedias, un winche y está

¹⁴ Fernández Ruiz, Inácio; Proyecto Colector Viña del mar, Pág. 37

¹⁵ Fernández Ruiz, Inácio; Proyecto Colector Viña del mar, Pág. 37

compuesta de: (Ver fotografía 6.27 y 6.28)

- 1 Válvula de accionamiento para la estación principal
- 1 Válvula de retorno para retirar los cilindros de la estación principal
- 6 Válvulas Stop para el respectivo grupo de cilindros de la estación principal
- 1 Válvula de accionamiento para las estaciones intermedias 1 y 2
- 1 Válvula de accionamiento para las estaciones intermedias 3 y 4
- 1 Válvula de conmutación del Sistema Hidráulico con Winche.



Fotografía 6.27: Tablero Hidráulico (vista frontal)



Fotografía 6.28: Tablero Hidráulico (vista inversa)

El tablero hidráulico se encuentra conectado con:

Tablero Hidráulico	Tanque Hidráulico	Con mangueras de alimentación y retorno de $\frac{3}{4}$ "x20 m y $1\frac{1}{4}$ "x 10 m de diámetro respectivamente
	Estación principal	Con mangueras de alimentación y retorno de $\frac{3}{4}$ "x20 m y $\frac{3}{4}$ "x10 m de diámetro respectivamente
	Winche	Con una manguera de alimentación y retorno de $\frac{1}{2}$ "x10 m de diámetro
	Estaciones Intermedias	Con una manguera de alimentación y retorno para cada estación de $\frac{3}{4}$ "x20 m de diámetro

El tablero hidráulico se encuentra en las cercanías de la estación principal y el winche; por razones de diseño del Pozo de empuje (Shaft) su ubicación es a 3.80 metros sobre el nivel del terreno y específicamente en el lado izquierdo de la dirección de empuje para tener mejor visibilidad.

Estaciones Intermedias

Las estaciones intermedias son usadas cuando la fuerza de presión de la estación principal, ya no es suficiente para determinadas longitudes de avance.

Con las estaciones intermedias se pueden realizar grandes longitudes de avance en secuencias de avances por tramos. El número de estaciones intermedias a instalar está en función de la longitud del tramo de avance, de la resistencia ofrecida por frente empujado, el rozamiento del contorno, el diámetro de los tubos, su fuerza de avance propia y la fuerza de avance de la estación principal.

Una vez que es instalada la estación del hincado auxiliar se mueve adelante con la tubería de manera normal hasta que su operación llegue a ser necesaria.

Las estaciones intermedias están dotadas en este caso de:

1. **Tubo perdido o Anillo metálico:** Este es un anillo de acero tiene 13 mm de espesor, 2500 mm de diámetro externo y 1500 mm de altura. Su función principal es soportar toda la parte hidráulica de la Estación Intermedia, para ello tiene un anillo fijo soldado de 26 mm de espesor y un ancho de 187.5 mm ubicada exactamente a 120 mm de uno de los extremos del tubo.

Los codos de acero soldados, son unas de las piezas que permiten nivelar y alinear los cilindros hidráulicos. (Ver fotografía 6.29)



Fotografía 6.29: Tubo perdido o anillo metálico

2. **Cilindros Hidráulicos:** Por razones de diseño, son ubicados 16 cilindros hidráulicos alrededor de la periferia del anillo metálico, estos cilindros son de simple efecto, tienen bases con rótulas que les permite el movimiento en todas las direcciones y sus características son: (Ver fotografía 6.30)

Presión Máxima	487.21	Bar.
Fuerza de compresión generada por una presión de 487.21 bar.	735.00	KN
Diámetro de émbolo	140	mm
Diámetro del vástago del émbolo	115	mm
Carrera	300	mm



Fotografía 6.30: Cilindros hidráulicos de Estación Intermedia

Todos los cilindros hidráulicos son montados e interconectados con:

- 64 Pernos hexagonales de $\frac{3}{4}$ "x2"
- 64 Arandelas de $\frac{3}{4}$ "
- 17 Mangueras hidráulicas de $\frac{1}{2}$ "x50 cm
- 32 Adaptadores de $\frac{3}{8}$ " a $\frac{1}{2}$ "
- 32 Sellos o nipples $\frac{1}{2}$ "
- 12 Tapones $\frac{3}{8}$ "
- 14 Respiros $\frac{3}{8}$ "
- 6 Adaptadores $\frac{1}{2}$ " a $\frac{1}{2}$ "
- 2 Codos $\frac{1}{2}$ "
- 1 Tee $\frac{1}{2}$ "
- 1 Reducción $\frac{3}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ "

Como los cilindros hidráulicos tienen mucha sensibilidad a la suciedad, se instala tres mangueras hidráulicas entre los respiros de los cilindros

que se encuentra en la parte baja de la estación intermedia, ya que este sector es el que está más expuesto a la mezcla bentonítica, aceite sucio y tierra proveniente de la excavación. (Ver fotografía 6.31)



Fotografía 6.31: Cilindros Hidráulicos

- 3. Medias Lunas:** Son segmentos circulares de acero de 26 mm de espesor y un ancho de 187.5 mm, en ellos se apoyan las otras bases de los cilindros hidráulicos, estos segmentos no son fijos y se desplazan en varios planos verticales. (Ver fotografía 6.32)

Cuatro segmentos circulares llegan a cubrir toda la circunferencia, dos de ellos son lisos y los dos restantes tienen soldado en la parte central los apoyos complementarios para nivelar a los cilindros hidráulicos. Estos segmentos son montados con 16 pernos tipo Allen de 5/8"x2"



Fotografía 6.32: Medias lunas

Sistema de Bentonita

Es un equipo integrado que es utilizado para la inyección de Bentonita y está compuesto por: (Ver fotografía 6.33)



Fotografía 6.33: Equipo de Bentonita

1. **Tanque de agua:** El tanque fue adaptado en un contenedor tiene una capacidad de 12 m³, el abastecimiento de agua es por medio de camiones cisterna de 9 m³ u 11 m³ que llenan periódicamente según el requerimiento del contratista. (Ver fotografía 6.34)



Fotografía 6.34: Tanque de agua

2. **Mixer:** Es el recipiente donde se prepara la mezcla bentonítica; el agua es transportado desde el tanque mediante una manguera de 1" de diámetro y una bomba de agua de 0.5 KW (Ver fotografía 6.35), el resto de ingredientes como: Bentonita, Dinomul y Quikgel son introducidos por una regilla de 51 x 68 cm que está ubicada en la parte superior

del recipiente del mixer.

El mixer tiene una capacidad de 0.5 m³ y un motor que aparte de mezclar todos los ingredientes para la mezcla bentonítica permite el traslado de ésta al estanque de acumulación.



Fotografía 6.35: Mixer y Bomba de agua

3. Estanque de acumulación: (Ver fotografía 6.36)

Es un recipiente de 1 m³ de capacidad, en ella se acumula la mezcla ya preparada, para poder inyectar a una presión máxima de 10 bar para ello se tiene una bomba de 7.5 KW. El estanque aloja el tablero de control de bombas y el intercomunicador que permite la mejor comunicación entre el operador de Shield, el operador del tablero hidráulico y el operador de bentonita.



Fotografía 6.36: Estanque de acumulación, tablero de control de bombas y bomba de inyección.

4. Mangueras y accesorios: (Ver fotografía 6.37)

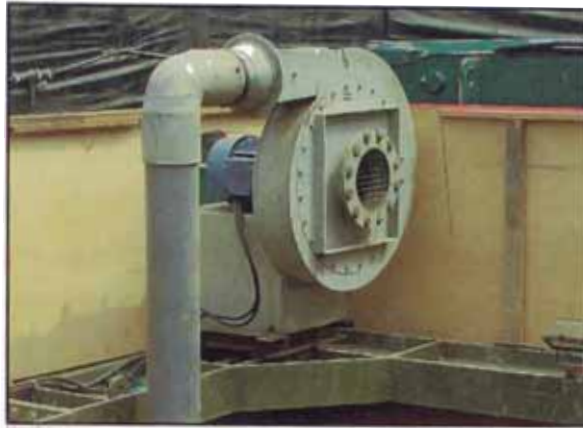


Fotografía 6.37: Accesorios

- Tubo para bentonita de $\phi = 2''$ L = 3 m más brida
- Soporte metálico para tubo de bentonita
- Niples de $\phi = 1''$ - acero galvanizado roscado a ambos lados
- Codo galvanizado $\phi = 1''$ - 45°
- Válvula plástica $\phi = 1''$
- Boquilla manguera-niple
- Tee galvanizada $\phi = 1''$
- Agarradera manguera-niple
- Mangueras de $\phi=1''$

Sistema de Ventilación

El ventilador está montado con cuatro pernos de $\frac{1}{2}'' \times 2''$ sobre una estructura metálica que se encuentra soldada en una de las vigas metálicas del pozo, el motor usado es de 15 KW y tiene un caudal de 2500 m³/h. (Ver fotografía 6.38)



Fotografía 6.38: Ventilador

Sus conexiones son:

- Dos codos de 200 mm de diámetro, uno en la salida del ventilador y otro justo al nivel del eje de los tubos de concreto.
- Un tubo de 200 mm x 10 m aproximadamente entre los codos antes mencionados.
- Un tubo de 200 mm x 2 m colocado horizontalmente para ser unido con las mangas de ventilación.
- Mangas de ventilación de 8" x 6m.

Sistema Electrico Principal

Dos generadores eléctricos son lo que entregan la energía eléctrica necesaria. El primero es de 250 KW y el segundo es de 58 KW, estos generadores alternan su trabajo según requerimiento.

Conexiones Principales

1. Tableros

Tablero general: A partir de este se distribuye la energía eléctrica a:

Iluminación externa	6 KW	40 Amp
Iluminación interna en el túnel	9 Watts x foco	32 Amp
Pipe Jacking	40 KW	200 Amp
Bombas Hidráulicas	66 KW	200 Amp

Bomba de mezcla de bentonita	5 KW	50 Amp
Ventilador	15 KW	32 - 50 Amp
Bomba de agua	0.5 KW	20 – 25 Amp
Bomba de inyección	12 KW	20 – 25 Amp

Tablero Pipe Jacking: Tiene un interruptor con protector de 125 Amp, preferentemente con regulador de rango, protección diferencial y salida de enchufe 200 Amp, tipo legrand.¹⁶ La distribución de energía eléctrica es la siguiente:

Ventilación de máquina	0.37 KW	1.2 Amp
Refrigeración de circuito hidráulico	1.10 KW	2.6 Amp
Bombas hidráulicas	30 KW	58 Amp
Faja transportadora 1	4 KW	8.5 Amp
Faja transportadora 2	4 KW	8.5 Amp

Tablero de bombas hidráulicas: Este tablero es de uso exclusivo de las bombas hidráulicas. El tablero es accionado por el operador del tablero hidráulico, según el requerimiento del sistema.

Bomba hidráulica 1	22 KW	43 Amp
Bomba hidráulica 2	22 KW	43 Amp
Bomba hidráulica 3	22 KW	43 Amp

- Iluminación del túnel:** La iluminación del túnel es con focos ahorradores de 9 Watts, clavados al techo a cada 9 metros.
- Iluminación externa:** La iluminación externa es con cuatro lámparas alógenas de 1 KW para iluminación del Shaft y cuatro lámparas alógenas de 0.5 KW para iluminación de áreas libres.
- Cables de Fuerza:** El cable deberá ser flexible con 04 conductores y las medidas de fase serán de 70 mm² de sección para el generador grande y 50 mm² para el generador pequeño.

¹⁶ Fernández Ruiz, Inácio; Proyecto Colector Vía del mar, Pág. 39

5. Cables Auxiliares: Los cables son de 04 conductores, tienen enchufes convencionales en cada equipo para facilitar su colocación y sus fases son respectivamente.

Iluminación externa	2.5 mm ²
Iluminación interna en el túnel	2.5 mm ²
Bombas Hidráulicas	50 mm ²
Bomba de mezcla de bentonita	4 mm ²
Ventilador	10 mm ²
Bomba de agua	2.5 mm ²
Bomba de inyección	4 mm ²

6. Cable de conexión de Tablero principal a Tablero de pozo: El cable deberá ser flexible con 04 conductores y las medidas de fase serán de 50 mm² de sección.

Construcción de Pozos

Los pozos son excavaciones con sección de 8.00 m X 5.00 m, que varían de profundidad según el perfil topográfico del terreno y su relación con la pendiente de la tubería, variando en profundidades entre los 7 m y 13 m.

Los pozos son construidos al comienzo y al final de cada tramo, llamándose Pozo de Salida por los cuales se saca e iza el Shield para su mantenimiento y/o traslado y Pozos de Empuje a aquellos por donde se baja el Shield y se monta el equipo necesario para el empuje.

Los pozos son construidos a base de estructuras metálicas (esqueleto) y entibado con cuarterones de madera, autosoportándose por fricción lateral.

Entonces se puede dividir en tres tipos de pozos:

1. Empuje – Empuje
2. Empuje – Salida
3. Salida - Salida

La profundidad del pozo de empuje es 0.65 m mayor que la del pozo de salida, debido a que tiene una losa de concreto armado de 0.25 m que es

la base de los rieles guía.

La dimensión en planta de los pozos de hincado es de 8 m en la dirección de hincado, y tiene relación con la longitud de la tubería (3 m), con la longitud de los cilindros hidráulicos principales recogidos, con el espesor de la placa de reacción,

Producción del Sistema de “Hincado de Tubos” o “Pipe Jacking”

En la producción incluimos varias actividades, entre ellas tenemos:

- 1. Excavación:** Consiste en hacer un hoyo o cavidad horizontal del terreno natural, quitándole parte de su masa con la Retroexcavadora Z3 y específicamente con el cucharón de 1pie³ de capacidad.

La excavación se debe de hacer en forma muy cuidadosa para evitar sobre-excavaciones y/o derrumbes. Sin embargo, se debe tener en cuenta que se debe excavar un diámetro ligeramente mayor que el diámetro externo de la tubería, para permitir dirigir la corona cortante y mantener una buena lubricación con la mezcla bentonítica.

Es importante tener en cuenta el tipo de material que se está excavando para escoger la metodología más adecuada¹⁷.

- 2.** Transporte de material a través de la faja primaria y secundaria, para entregarlo a una vagoneta.
- 3. Transporte horizontal:** Que consiste en el recorrido de la vagoneta a lo largo de todo el túnel, tanto de ida (Shield hasta Estación principal), como de vuelta (Estación principal hasta Shield). Este transporte es posible por el uso de winches, que son accionados uno por el operador del Shield y el otro por el operador del Tablero Hidráulico.
- 4. Transporte vertical:** Consiste en el izado de la vagoneta llena, desde el pozo de empuje hasta la superficie cerca del volquete de 12 m³ con una grúa de 50 ton y el retorno de otra vagoneta vacía desde la superficie hasta el pozo de empuje.
- 5. Proceso de inyección de Bentonita:** Consiste en la lubricación de la

¹⁷ Fernández Ruiz, Inácio; Proyecto Colector Viña del mar, Pág. 43.

superficie de los tubos y del Shield, para disminuir las fuerzas de fricción generadas por el tipo de suelo en el momento de hincado. La mezcla bentonítica sólo podrá trabajar efectivamente si es que una capa es mantenida entre el exterior de la tubería y la superficie de suelo excavado.

La mezcla en este caso está compuesta de Quik-gel, Liqui-trol, Dinomul y agua.

QUIK-GEL: Es una bentonita de sodio de Wyoming, de alta calidad y alto rendimiento, molida finamente (que pasa la malla N° 200) y fácil de mezclar. QUIK-GEL Imparte características de viscosidad, control de pérdida de fluido y gelación a fluidos de perforación con base de agua dulce¹⁸.

Propiedades típicas

Aspecto	Polvo de color gris o marrón
Densidad aparente lb/ft ³	68 a 72 (compacto)
PH (Solución de un 3%)	8.9

LIQUI-TROL: Es una suspensión líquida y fluida de un polímero celulósico natural modificado, en un aceite ultra limpio y no tóxico. Cuando se agrega LIQUI-TROL a un lodo preparado con QUIK-GEL se obtiene un sistema de lodo de perforación adecuado para perforar en formaciones sensibles al agua, minimizando la vibración, la fuerza torsional de rotación y la presión de circulación.

Propiedades típicas

Aspecto blanquecino	Líquido viscoso fluido de color
Gravedad específica	0.98
PH (Solución de un 0.3%)	9.0
Punto de inflamación, PMCC °F (°C)	185, (85)

¹⁸ Manual de Normas técnicas de Productos Baroid, Industrial Drilling, Copyright 2001 Baroid, a Haliburton PSL.

Punto de fluidez, °F (°C)	35, (1.7)
Punto de congelación, °F (°C)	-40, (-40)

DINOMUL: Es un estabilizador y fluido lubricante de base acuosa para reducción de torque en aplicaciones de perforación seleccionadas, que reduce el arrastre de la tubería mientras se perfora y previene el pegado diferencial.

Propiedades típicas

Apariencia	Líquido fluido marrón oscuro
Gravedad específica	1.0
PH	7.2 a 8.2
Solubilidad	Miscible en agua

La dosificación de la mezcla es la siguiente para 500 litros de agua:

QUIK – GEL (sacos)	1
DINOMUL (l)	6
LIQUITROL (l)	2

6. Instalación de tubos de Concreto armado:

La colocación de un nuevo tubo se da cuando el tubo anterior ha sido completamente hincado.

Existen tres tipos de tubo:

Tubo A: Es un tubo de concreto armado, es instalado antes de la Estación Intermedia, este tubo posee características especiales de diseño para un correcto acople a la estación intermedia.

Tubo B: Es un tubo de concreto armado, es instalado después de la Estación intermedia e igual que el Tubo A, sus características son distintas del tubo estándar.

Tubo estándar: Existen dos tipos de tubo estándar:

Tubo con perforación para bentonita.- Es un tubo de concreto armado y tiene perforaciones que permiten la inyección de bentonita por medio de mangueras, estas perforaciones están distribuidas a cada 120° en toda la superficie del tubo.

Tubo sin perforación.- También es un tubo de concreto armado y es el primero en colocarse después del Shield.