

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Metodología	3
1.4. Estructura	3
2. Revisión Bibliográfica	4
2.1. Efecto de la Programación de Semáforos en el Transporte Público	4
2.2. Efecto de las Tasas de Ocupación en la Programación de Semáforos	5
2.3. Modelos de Tiempo de Ciclo Óptimo para una Intersección Aislada	7
2.3.1. Modelo de Webster (1958)	7
2.3.2. Modelo de Akcelik (1981)	10
2.4. Herramientas Computacionales	12
2.4.1. Aimsun 8	13
2.4.2. Transyt 15	14
2.5. Histogramas de Flujo	17
3. Optimización de la Programación de un Semáforo Aislado considerando Tasas de Ocupación	18
3.1. Modelo de Akcelik Modificado de Tiempo de Ciclo	18
3.1.1. Modelo Akcelik Modificado 1: Minimización de Demoras (ponderador de detenciones $k=0$)	18
3.1.2. Modelo Akcelik Modificado 2: Minimización de Demoras y Detenciones de Vehículos ($k=0,2$)	25
3.1.3. Modelo de Akcelik 3: Minimización de Demoras y Detenciones de Vehículos usando K Actualizado por Tipo de Vehículo	29
3.1.4. Limitaciones Modelo de Akcelik	32
3.2. Modelo de Tiempo de Ciclo y Tiempos de Verde Óptimos considerando Tasas de Ocupación	35
3.2.1. Escenarios de Modelación	38
3.2.2. Modelos basados en Tasas de Ocupación de Buses y Automóviles	40
3.3. Resumen, Análisis y Recomendaciones del Modelo	48
3.4. Aplicación del Modelo a un Caso de Estudio	51
4. Comparación Herramientas Computacionales: Histograma de Flujo de Buses	59

4.1.	Descripción de la Red	59
4.2.	Histogramas Situación Actual de la Red	63
4.3.	Histogramas de Red Modelada en Transyt 15	65
4.3.1.	Histogramas de Red Modelada con PDM	67
4.3.2.	Histogramas de Red Modelada con CTM	69
4.4.	Histogramas de Red Modelada en Aimsun 8	71
4.5.	Síntesis y Análisis de Histogramas Obtenidos	74
5.	Programación Óptima de una Red Simple considerando Tasas de Ocupación	81
5.1.	Descripción de la Red	81
5.2.	Escenarios	87
5.3.	Ponderadores de Demoras y Detenciones	88
5.4.	Resultados y Análisis	91
5.4.1.	Escenarios con Transyt 15	91
5.5.	Síntesis final	116
6.	Conclusiones	117
6.1.	Síntesis y Conclusiones	117
6.2.	Líneas Futuras de Investigación	120
	Bibliografía	121
	Anexos	123
A.	Códigos programados en MATLAB	124
A.1.	Código de minimización de demoras vehiculares	124
A.2.	Código de minimización de demoras vehiculares y detenciones	124
A.3.	Código de minimización de demoras de personas y detenciones	124
B.	Comparación modelos de tasas de ocupación	125
B.1.	Aplicación de modelos a datos con un grado de saturación máximo de 0,90	125
B.2.	Aplicación de modelos a datos con un grado de saturación máximo de 0,95 y un factor de carga total máximo de 0,85	127
C.	Parámetros de Modelación de la Red para Histogramas	129
C.1.	Flujos por pista y factores de corrección	130
C.2.	Factores de equivalencia compuestos por pista y ponderados por el flujo	131
D.	Parámetros de Modelación de la Red para Casos de Estudio	132
D.1.	Flujos por pista y factores de corrección	133
D.2.	Factores de equivalencia por pista	135
D.3.	Flujos por pista y factores de corrección sin buses en ejes transversales	136
D.4.	Factores de equivalencia por pista sin flujo de buses en ejes transversales	138

Índice de Tablas

3.1. Valor parámetros C_{det} , C_{ral} y K	29
3.2. Parámetros modelos de tiempo de ciclo óptimo	31
3.3. Valor parámetros C_{det} , C_{ral} y K	35
3.4. Categorías niveles de ocupación de buses	36
3.5. Tasas de Ocupación Buses SECTRA	36
3.6. Valores esperados de las constantes	38
3.7. Valor parámetros ajustados para cada uno de los modelos propuestos	38
3.8. Parámetro para modelo de tiempo de ciclo	40
3.9. Parámetro para modelo de tiempos de verde	41
3.10. Diferencias porcentuales entre máximos y mínimos de cada parámetro	41
3.11. Ajuste para datos de validación	43
3.12. Valor parámetros modelo con tasas de ocupación intermedias	46
3.13. Datos por casos en la intersección	47
3.14. Resultados obtenidos modelos	47
3.15. Parámetros del problema	52
3.16. Flujo de peatones en intersección Beauchef con Blanco Encalada Modificada	52
3.17. Flujo de vehículos caso Blanco Encalada Modificado	53
3.18. Factores de equivalencia compuestos por pista [veq/veh]	53
3.19. Factores de carga Blanco Encalada con Beauchef	53
3.20. Resultados caso Blanco Encalada Modificado por acceso (Capacidades en [veh/h])	54
3.21. Capacidades y grados de saturación por pista caso Blanco Encalada Modificado	54
3.22. Demoras para vehículos y personas caso Blanco Encalada Modificado	54
3.23. Demoras por acceso	55
4.1. Matriz OD Autos	60
4.2. Matriz OD Camiones	60
4.3. Matriz OD Buses	60
4.4. Matriz OD Mini Buses	60
4.5. Tiempos de detención de buses en paradero 1	60
4.6. Tiempos de viaje medidos	61
4.7. Variabilidad de salida de buses	61
4.8. Programación actual	61
4.9. Flujo de saturación básico (ADE/h-pista)	66
4.10. Parámetros de calibración automóviles Aimsun	71
4.11. Parámetros de calibración buses Aimsun	71

5.1. Matriz OD Autos	82
5.2. Matriz OD Camiones	82
5.3. Matriz OD Buses	82
5.4. Matriz OD Mini Buses	82
5.5. Flujos peatonales [peat/h]	83
5.6. Tiempos de detención de buses en paraderos	83
5.7. Tasas de ocupación	83
5.8. Relación tasas de ocupación	83
5.9. Tiempos de viaje medidos	83
5.10. Flujo de saturación básico (ADE/h-pista)	84
5.11. Programación actual	85
5.12. Cálculo de ponderadores globales	89
5.13. Ponderadores en pesos chilenos	89
5.14. Ponderadores en dólares	90
5.15. Programaciones obtenidas con Transyt Caso 1	92
5.16. Razones de verde efetivo obtenidas con Transyt Caso 1	92
5.17. Demoras medias vehiculares obtenidas con Transyt Caso 1	93
5.18. Variación demoras medias vehiculares Caso 1	93
5.19. Demoras de personas obtenidas con Transyt Caso 1	93
5.20. Variación demoras de personas Caso 1	93
5.21. Tiempos de Viaje Transyt Caso 1	94
5.22. Variación Tiempos de Viaje Transyt Caso 1	94
5.23. Tiempos de Viaje Transyt Caso 1	94
5.24. Variación Tiempos de Viaje Transyt Caso 1	95
5.25. Grados de saturación por pista Transyt Caso 1	97
5.26. Programaciones obtenidas con Transyt Caso 2	98
5.27. Razones de verde efectivo obtenidas con Transyt Caso 2	98
5.28. Demoras medias vehiculares obtenidas con Transyt Caso 2	99
5.29. Variación demoras medias vehiculares Caso 2	99
5.30. Demoras de personas obtenidas con Transyt Caso 2	99
5.31. Variación demoras de personas Caso 2	99
5.32. Tiempos de Viaje Transyt Caso 2	100
5.33. Variación Tiempos de Viaje Transyt Caso 2	100
5.34. Tiempos de Viaje Transyt Caso 2	100
5.35. Variación Tiempos de Viaje Transyt Caso 2	100
5.36. Grados de saturación por pista Transyt Caso 2	102
5.37. Programaciones obtenidas con Transyt Caso 3	103
5.38. Razones de verde efectivo obtenidas con Transyt Caso 3	103
5.39. Demoras medias vehiculares obtenidas con Transyt Caso 3	104
5.40. Variación demoras medias vehiculares Caso 3	104
5.41. Demoras de personas obtenidas con Transyt Caso 3	104
5.42. Variación demoras de personas Caso 3	104
5.43. Tiempos de Viaje Transyt Caso 3	105
5.44. Variación Tiempos de Viaje Transyt Caso 3	105
5.45. Tiempos de Viaje Transyt Caso 3	105
5.46. Variación Tiempos de Viaje Transyt Caso 3	105
5.47. Grados de saturación por pista Transyt Caso 3	106

5.48. Programaciones obtenidas con Transyt Caso 4	107
5.49. Razones de verde efectivo obtenidas con Transyt Caso 4	107
5.50. Demoras medias vehiculares obtenidas con Transyt Caso 4	108
5.51. Variación demoras medias vehiculares Caso 4	108
5.52. Demoras de personas obtenidas con Transyt Caso 4	108
5.53. Variación demoras de personas Caso 4	108
5.54. Tiempos de Viaje Transyt Caso 4	109
5.55. Variación Tiempos de Viaje Transyt Caso 4	109
5.56. Tiempos de Viaje Transyt Caso 4	109
5.57. Variación Tiempos de Viaje Transyt Caso 4	109
5.58. Grados de saturación por pista Transyt Caso 4	111
5.59. Programaciones obtenidas con Transyt Caso 5	112
5.60. Razones de verde efectivo obtenidas con Transyt Caso 5	112
5.61. Demoras medias vehiculares obtenidas con Transyt Caso 5	113
5.62. Variación demoras medias vehiculares Caso 5	113
5.63. Demoras de personas obtenidas con Transyt Caso 5	113
5.64. Variación demoras de personas Caso 5	113
5.65. Tiempos de Viaje Transyt Caso 5	114
5.66. Variación Tiempos de Viaje Transyt Caso 5	114
5.67. Tiempos de Viaje Transyt Caso 5	114
5.68. Variación Tiempos de Viaje Transyt Caso 5	114
5.69. Grados de saturación por pista Transyt Caso 5	115
B.1. Valor parámetros ajustados para cada uno de los modelos propuestos	125
B.2. Valor parámetros ajustados para cada uno de los modelos propuestos	127
C.1. Flujo por pista y movimiento	130
C.2. Factores de corrección y flujo de saturación	130
C.3. Factores de equivalencia por pista	131
C.4. Factores de equivalencia ponderados por flujo de cada pista [veh/veh]	131
D.1. Flujo por pista y movimiento	133
D.2. Factores corrección y flujo de saturación final	134
D.3. Factores de equivalencia por pista	135
D.4. Flujo por tipo y movimiento	136
D.5. Factores corrección y flujo de saturación	137
D.6. Factores de equivalencia por pista	138

Índice de Ilustraciones

2.1. Herramientas computacionales en los niveles de modelación. Fuente: Elaboración propia	13
3.1. Caso 2 fases	19
3.2. Caso 3 fases	19
3.3. Diseño de fases: (a) Caso 2 Fases, (b) Caso 3 Fases	20
3.4. Distribución de MAPE para distintos niveles de tiempo de ciclo óptimo, Modelo Akcelik 1	21
3.5. Distribución de MAPE para distintos niveles de tiempo de ciclo óptimo, Modelo Akcelik Modificado 1	22
3.6. Distribución de MAPE dato validación para distintos niveles de tiempo de ciclo óptimo, Modelo Akcelik 1	23
3.7. Distribución de MAPE datos de validación para distintos niveles de tiempo de ciclo óptimo, Modelo Akcelik Modificado 1	23
3.8. Diferencia entre los tiempos de ciclo óptimos obtenidos numéricamente y por el Modelo Akcelik 1	24
3.9. Diferencia entre los tiempos de ciclo óptimos obtenidos numéricamente y por el Modelo Akcelik Modificado 1	24
3.10. Distribución MAPE por ciclo Modelo Akcelik 2	25
3.11. Distribución MAPE por ciclo Modelo Akcelik Modificado 2	26
3.12. Distribución MAPE para los datos de validación Modelo Akcelik 2	27
3.13. Distribución MAPE para los datos de validación Modelo Akcelik Modificado 2	27
3.14. Diferencia entre los tiempos de ciclo óptimos obtenidos numéricamente y por el Modelo Akcelik 2 para datos de validación	28
3.15. Diferencia entre los tiempos de ciclo óptimos obtenidos numéricamente y por el Modelo Akcelik Modificado 2 para datos de validación	28
3.16. Distribución MAPE por ciclo Modelo Akcelik 3	30
3.17. Distribución MAPE para los datos de validación Modelo Akcelik 3	30
3.18. Diferencia entre los tiempos de ciclo óptimos obtenidos numéricamente y por el Modelo Akcelik 3 para datos de validación	31
3.19. Diferencia entre tiempo de ciclo obtenido numéricamente y calculado por el Modelo Akcelik 2	32
3.20. Distribución MAPE por ciclo sin restricción de Y para Modelo Akcelik 2	33
3.21. Distribución MAPE por ciclo con restricción de Y para Modelo Akcelik 2	33
3.22. Distribución MAPE por ciclo sin restricción de Y para Modelo Akcelik Modificado 2	34

3.23. Distribución MAPE por ciclo con restricción de Y para Modelo Akcelik Modificado 2	34
3.24. Distribución MAPE por ciclo para grados de saturación hasta (a) 0,90 (b) 0,95 (c) 1,00 (d) 1,00 e Y hasta 0,85 (e) 0,95 e Y hasta 0,85	39
3.25. Distribución MAPE por tiempo de ciclo: (a) TOC 1,00 pax/veh; (b) TOC 1,25 pax/veh; (c) TOC 1,50 pax/veh; (d) TOC 1,75 pax/veh; (e) TOC 2,00 pax/veh	42
3.26. Distribución MAPE por tiempo de ciclo para datos de validación: (a) TOC 1,00 pax/veh; (b) TOC 1,25 pax/veh; (c) TOC 1,50 pax/veh; (d) TOC 1,75 pax/veh; (e) TOC 2,00 pax/veh	44
3.27. Diferencia entre tiempo de ciclo óptimo obtenido numéricamente con respecto al estimado para los datos de validación: (a) 1,00 pax/veh, (b) 1,25 pax/veh, (c) 1,50 pax/veh, (d) 1,75 pax/veh, (e) 2,00 pax/veh	45
3.28. (a) Regresión Lineal Parámetro c (b) Regresión Lineal Parámetro f	46
3.29. Ejemplo de intersección	47
3.30. Curvas de nivel μ_{TOC}/μ_{Ak} para distintas razones de flujo y tasas de ocupación de buses y automóviles	49
3.31. Intersección Beauchef con Blanco Encalada Modificada	51
3.32. Diseño de Fases Intersección Beauchef con Blanco Encalada Modificada	52
3.33. Caso Viel: (a) Demoras vehiculares Akcelik, (b) Demoras de personas Modelo TOC, (c) Función objetivo Akcelik, (d) Función objetivo Modelo TOC	56
3.34. Caso 2: (a) Razón de verde efectivo accesos 1 y 2 con flujo de buses constante, (b) Razón de verde efectivo acceso 3 con flujo de buses constante, (c) Razón de verde efectivo accesos 1 y 2 con tasas de ocupación constantes, (d) Razón de verde efectivo acceso 3 con tasas de ocupación constantes	57
4.1. Puntos de grabación	60
4.2. Diagrama de desfase	62
4.3. Diseño de fases: (a) Intersección Blanco Encalada con Beauchef, (b) Intersección Blanco Encalada con Club Hípico	62
4.4. Punto de Salida Histograma	63
4.5. Histogramas situación actual: (a) Intervalo 1 segundo, (b) Intervalo 4 segundos, (c) Intervalo 1 segundo buses se detienen en el paradero, (d) Intervalo 4 segundos buses se detienen en el paradero, (e) Intervalo 1 segundo buses no se detienen en el paradero, (f) Intervalo 4 segundos buses no se detienen en el paradero	64
4.6. Red Modelada en Transyt 15	65
4.7. Detalle Paradero Modelado en Transyt 15	66
4.8. Histogramas situación actual en Transyt 15 con PDM: (a) Intervalo 1 segundo, (b) Intervalo 4 segundos, (c) Intervalo 1 segundo buses se detienen en el paradero, (d) Intervalo 4 segundos buses se detienen en el paradero, (e) Intervalo 1 segundo buses no se detienen en el paradero, (f) Intervalo 4 segundos buses no se detienen en el paradero	68
4.9. Histogramas situación actual en Transyt 15 con CTM: (a) Intervalo 1 segundo, (b) Intervalo 4 segundos, (c) Intervalo 1 segundo buses se detienen en el paradero, (d) Intervalo 4 segundos buses se detienen en el paradero	69

4.10. Histogramas situación actual en Transyt 15 con CTM: (e) Intervalo 1 segundo buses no se detienen en el paradero, (f) Intervalo 4 segundos buses no se detienen en el paradero	70
4.11. Red Modelada en Aimsun 8	71
4.12. Histogramas situación actual en Aimsun: (a) Intervalo 1 segundo, (b) Intervalo 4 segundos, (c) Intervalo 1 segundo buses se detienen en el paradero, (d) Intervalo 4 segundos buses se detienen en el paradero, (e) Intervalo 1 segundo buses no se detienen en el paradero, (f) Intervalo 4 segundos buses no se detienen en el paradero	72
4.13. Histogramas Réplicas en Aimsun: (a) Réplica 1, (b) Réplica 2, (c) Réplica 3, (d) Réplica 4	73
4.14. Histogramas Réplicas en Aimsun: (e) Réplica 5, (f) Réplica 6: (g) Réplica 7, (h) Réplica 8 (i) Réplica 9, (j) Réplica 10	74
4.15. Histogramas buses que se detienen y no se detienen en el paradero: (a) Situación real, (b) Modelo Transyt PDM	75
4.16. Histogramas buses que se detienen y no se detienen en el paradero: (a) Situación real, (b) Modelo Transyt CTM	76
4.17. Histogramas buses que se detienen y no se detienen en el paradero: (a) Situación real, (b) Modelo Aimsun	76
4.18. Histogramas buses que se detienen y no se detienen en el paradero: (a) Situación real, (b) Modelo Aimsun (Réplica 1)	77
4.19. Histogramas buses que se detienen en el paradero: (a) Situación real, (b) Modelo Transyt PDM	77
4.20. Histogramas buses que se detienen en el paradero: (a) Situación real, (b) Modelo Transyt CTM	78
4.21. Histogramas buses que se detienen en el paradero: (a) Situación real, (b) Modelo Aimsun	78
4.22. Histogramas buses que no se detienen en el paradero: (a) Situación real, (b) Modelo Transyt PDM	79
4.23. Histogramas buses que no se detienen en el paradero: (a) Situación real, (b) Modelo Transyt CTM	79
4.24. Histogramas buses que no se detienen en el paradero: (a) Situación real, (b) Modelo Aimsun	80
5.1. Red Blanco Encalada	82
5.2. Red modelada en Transyt 15	85
5.3. Desfase Red Blanco Encalada	86
5.4. Diseño de fases: (a) Intersección Blanco Encalada con Beauchef, (b) Intersección Blanco Encalada con Club Hípico	87
5.5. Movimientos red Blanco Encalada	91
5.6. Distribución de pistas red Blanco Encalada	96
B.1. Distribución MAPE por ciclo datos modelo M1 para grados de saturación hasta (a) 0,90 (b) 0,95 (c) 1,00 (d) 1,00 e Y hasta 0,85 (e) 0,95 e Y hasta 0,85	126
B.2. Distribución MAPE por ciclo datos modelo M5 para grados de saturación hasta (a) 0,90 (b) 0,95 (c) 1,00 (d) 1,00 e Y hasta 0,85 (e) 0,95 e Y hasta 0,85	128
C.1. Distribución pistas red Blanco Encalada	129

D.1. Distribución pistas red Blanco Encalada	132
--	-----