

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE
VEHÍCULO TIPO ROVER NO TRIPULADO PARA LA SIEMBRA, FUMIGACIÓN
Y TRANSPORTE DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS EN TERRENOS
IRREGULARES DEL CORREGIMIENTO DE BERLÍN SANTANDER**

GUILLERMO ANTONIO CARRASQUILLA MERCADO

HEIDER AUGUSTO CARVAJAL PULIDO

JOSÉ DANIEL BOHÓRQUEZ GUERRA

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
SANTANDER
BUCARAMANGA
JUNIO 2021**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE VEHÍCULO
TIPO ROVER NO TRIPULADO PARA LA SIEMBRA, FUMIGACIÓN Y
TRANSPORTE DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS EN TERRENOS IRREGULARES
DEL CORREGIMIENTO DE BERLÍN SANTANDER**

GUILLERMO ANTONIO CARRASQUILLA MERCADO

HEIDER AUGUSTO CARVAJAL PULIDO

JOSÉ DANIEL BOHÓRQUEZ GUERRA

Director del proyecto: SEBASTIAN ROA PRADA, PhD

Codirector del proyecto: M. Sc. CAMILO MONCADA GUAYAZÁN

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
SANTANDER
BUCARAMANGA
JUNIO 2021**

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	25
AGRADECIMIENTOS.....	26
1. INTRODUCCIÓN	27
2. OBJETIVOS	28
2.1. OBJETIVO GENERAL	28
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	28
3. MARCO TEORICO.....	29
3.1. CULTIVOS DE CEBOLLA	29
3.2. ESTABLECIMIENTO Y MANEJO DEL CULTIVO.....	30
3.3. PERIODO VEGETATIVO DEL CULTIVO	31
3.4. ROBOT INDUSTRIAL.....	31
3.5. VEHÍCULO TIPO ROVER.....	32
3.5.1. SISTEMA DE SUSPENSIÓN ROCKER BOGIE.....	32
3.5.2. SOLERO	32
3.5.3. NANOKHOD	34
3.6. METODO NEWTON-EULER.....	35
3.6.1. SUMATORIA DE FUERZAS O FUERZA RESULTANTE.....	35
3.6.2. SUMATORIA DE MOMENTOS O MOMENTO RESULTANTE	36
3.6.3. RELACIÓN GENERAL DE VELOCIDAD Y ACELERACIÓN ENTRE 2 PUNTOS.....	36
3.6.4. TEOREMA DE SUMA DE VELOCIDADES ANGULARES.....	38
3.6.5. DERIVADA CINEMÁTICA.....	38
3.6.6. ACELERACIONES ANGULARES.....	39
3.6.7. INTERACCIÓN LLANTA – SUELO.....	39
3.7. MICROCONTROLADORES	43
3.7.1. RASPBERRY PI.....	43
3.7.2. ARDUINO.....	43
3.8. APP INVENTOR	44
3.9. BLUETOOTH.....	44
3.10. ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS (FEA)	45
4. DESARROLLO	47

4.1.	MEDIDAS DEL CULTIVO	47
4.2.	BOSQUEJOS	51
4.2.1.	PRIMER BOSQUEJO	51
4.2.2.	SEGUNDO BOSQUEJO	52
4.2.3.	TERCER BOSQUEJO.....	53
4.3.	ELEMENTOS DE MAQUINA.....	54
4.3.1.	UNIÓN ROCKER - BOGIE Y UNIÓN ENTRE LOS MECANISMOS...54	
4.3.2.	UNIÓN BOGIE – C’S Y ROCKER – C’S	55
4.3.3.	TRANSMISIÓN DE DIRECCIÓN	56
4.3.4.	ANCLAJE LLANTA CON C	57
4.3.5.	ANCLAJE DE MOTORREDUCTOR.....	58
4.4.	DISEÑOS CAD	58
4.4.1.	MECANISMO	59
4.4.2.	TRANSPORTE.....	61
4.4.3.	RIEGO.....	63
4.4.4.	SIEMBRA	65
4.5.	MODELO MATEMÁTICO	66
4.5.1.	CINEMÁTICA	66
4.5.1.1.	NOMBRE DE LOS CUERPOS	66
4.5.1.2.	SISTEMAS COORDENADOS	67
4.5.1.3.	PUNTOS CLAVE	68
4.5.1.4.	PARÁMETROS.....	69
4.5.1.5.	ÁNGULOS DE LOS CUERPOS	72
4.5.1.6.	MATRICES DE ROTACIÓN	73
4.5.1.7.	POSICIONES	74
4.5.1.8.	VELOCIDADES	77
4.5.1.9.	ACELERACIONES	78
4.5.2.	CINÉTICA	81
4.5.2.1.	CÁLCULO DE REACCIONES INTERNAS	81
4.5.2.2.	ANÁLISIS INTERACCIÓN LLANTA-SUELO	87
4.5.2.3.	SIMULACIÓN SOLIDWORKS	89
4.5.2.4.	CODIGO MATLAB.....	95
4.5.2.5.	RESULTADOS SIMULACIÓN	104

4.6.	ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS.....	110
4.6.1.	ANÁLISIS ROCKER.....	111
4.6.1.1.	VON MISSES	111
4.6.1.2.	DESPLAZAMIENTOS.....	112
4.6.1.3.	DEFORMACIÓN UNITARIA	113
4.6.1.4.	FACTOR DE SEGURIDAD.....	113
4.6.1.5.	RESUMEN DE RESULTADOS ROCKER	114
4.6.2.	ANÁLISIS BOGIE.....	114
4.6.2.1.	VON MISSES	115
4.6.2.2.	DESPLAZAMIENTOS.....	115
4.6.2.3.	DEFORMACIÓN UNITARIA	116
4.6.2.4.	FACTOR DE SEGURIDAD.....	117
4.6.2.5.	RESUMEN DE RESULTADOS DEL BOGIE	117
4.6.3.	ANÁLISIS C	118
4.6.3.1.	VON MISSES	118
4.6.3.2.	DESPLAZAMIENTOS.....	119
4.6.3.3.	DEFORMACIÓN UNITARIA	120
4.6.3.4.	FACTOR DE SEGURIDAD.....	121
4.6.3.5.	RESUMEN DE RESULTADOS C	121
4.6.3.6.	RESUMEN DE RESULTADOS.....	122
4.7.	ELECTRÓNICA DEL MECANISMO	122
4.7.1.	ACTUADORES	123
4.7.2.	SENSORES	126
4.7.3.	DRIVERS	127
4.7.4.	CONTROLADOR	130
4.8.	PROGRAMACIÓN.....	131
4.8.1.	ARDUINO.....	132
4.8.2.	APP INVENTOR.....	133
4.8.2.1.	VENTANA PRINCIPAL.....	134
4.8.2.2.	VENTANA COMANDOS POR VOZ.....	135
4.8.2.3.	VENTANA CONTROL POR BOTONES	137
4.9.	DIAGRAMA ELECTRICO	139
4.9.1.	CONEXIÓN SERVOMOTORES.....	141

4.9.2.	CONEXIÓN MPU6050 Y MODULO BLUETOOTH	142
4.9.3.	CONEXIÓN DRIVERS Y MOTORREDUCTORES.....	143
5.	RESULTADOS	144
5.1.	TRANSPORTE	144
5.1.1.	ÁNGULOS DE GIRO.....	148
5.1.3.	ALTURA DE OBSTACULOS.....	151
5.2.	SIEMBRA.....	152
5.2.1.	VELOCIDAD DE LA SIEMBRA:	155
5.3.	RIEGO	155
5.4.	COSTOS.....	157
5.4.1.	COMPONENTES ELECTRICOS Y ELECTRÓNICOS.....	157
5.4.2.	MATERIAL	158
5.4.3.	TRANSPORTES	160
5.5.	MANUAL DEL USUARIO.....	160
5.6.	RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	162
6.	CONCLUSIONES.....	164
7.	BIBLIOGRAFIA	166
8.	ANEXOS	169
8.1.	MODELO MATEMÁTICO – NEWTON-EULER.....	169
8.1.1.	ÁNGULOS.....	169
8.1.2.	VELOCIDADES.....	170
8.1.3.	ACELERACIONES.....	180
8.1.4.	POSICIONES DE LOS CENTROIDES DE LOS CUERPOS.....	190
8.1.5.	VELOCIDADES DE LOS CENTROIDES DE LOS CUERPOS.....	191
8.1.6.	ACELERACIONES DE LOS CENTROIDES DE LOS CUERPOS....	195
8.1.7.	DIAGRAMAS DE CUERPO LIBRE	199
8.1.8.	SUMATORIA DE FUERZAS	201
8.1.9.	SUMATORIA DE MOMENTOS	202
8.2.	MODELO MATEMÁTICO EN MATLAB	206
8.3.	PROGRAMACIÓN APLICACIÓN	234
8.3.1.	VENTANA DE CONTROL POR VOZ.....	234
8.3.2.	VENTANA DE CONTROL POR BOTONES.....	236
8.4.	PROGRAMACIÓN EN ARDUINO.....	237

8.5.	PLANOS DEL VEHÍCULO	249
8.6.	MANUAL DEL USUARIO.....	340

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Producción anual en toneladas Fuente: DANE, ENA 2014.....	29
Ilustración 2 Partes del rocker bogie	32
Ilustración 3 Partes del solero.....	33
Ilustración 4 Solero con panel solar.	31
Ilustración 5 Partes del nanokhod.....	34
Ilustración 6 Partes oruga para nanokhod	35
Ilustración 7 Dos partículas moviéndose en relación al punto “O”.....	37
Ilustración 8 Fuerzas en la llanta en reposo y en movimiento inminente	40
Ilustración 9 Llanta con movimiento inminente accionada por una fuerza	41
Ilustración 10 Llanta con movimiento inminente accionada por un momento	41
Ilustración 11 Placa raspberry pi Fuente: Raspberry pi.....	43
Ilustración 12 Placa arduino mega Fuente: Arduino.....	44
Ilustración 13 Logotipo app inventor Fuente: App inventor.	44
Ilustración 14 Análisis elementos finitos Fuente: Siemens.....	46
Ilustración 15 Medida de semillas de cebolla de rama.....	48
Ilustración 16 Altura de plantas con surco	49
Ilustración 17 Cultivo organizado en rectángulos.....	50
Ilustración 18 Cultivo organizado en rombos.	51
Ilustración 19 Primer Bosquejo Rocker Bogie	52
Ilustración 20 Segundo Bosquejo Rocker Bogie	52
Ilustración 21 Tercer Bosquejo Rocker Bogie	53
Ilustración 22 Bosquejo 3 escalado 0.5.....	53
Ilustración 23 Unión Rocker – Bogie.....	55
Ilustración 24 Detalle Mecanismo Unión Bogie – C.	56
Ilustración 25 Engranajes para dirección	57
Ilustración 26 Unión Llanta – C.....	57
Ilustración 27 Fijación Motorreductor.	58
Ilustración 28 Mecanismo Rocker Bogie vista isométrica	59
Ilustración 29 Mecanismo Rocker Bogie vista lateral	59
Ilustración 30 Mecanismo Unión Bogie – C.	60
Ilustración 31 Placa en estado inicial	61
Ilustración 32 Lámina transporte.....	61
Ilustración 33 Placa en modo transporte.....	62
Ilustración 34 Vehículo en modo transporte.....	62
Ilustración 35 Placa riego.....	63
Ilustración 36 Servomotor y válvula	63
Ilustración 37 Cabeza de la válvula y brazo del servomotor.	64
Ilustración 38 Manguera para riego.....	64
Ilustración 39 Placa de siembra	65
Ilustración 40 Placa con Tolva	65
Ilustración 41 Nombre de los cuerpos.....	66
Ilustración 42 Sistemas coordenados.	68

Ilustración 43 Puntos clave del mecanismo	68
Ilustración 44 Parámetros del rocker bogie.....	69
Ilustración 45 Parámetros de distancia en el rocker.....	69
Ilustración 46 Parámetros de distancias al centroide del rocker desde el punto P1.	70
Ilustración 47 Parámetros de distancias en el bogie	70
Ilustración 48 Parámetros de distancias entre el centroide del bogie y el punto P2.	70
Ilustración 49 Parámetros de distancias en la c.....	71
Ilustración 50 Parámetros de distancia entre el centroide de la "c" y el punto P3.	71
Ilustración 51 Ángulos de los cuerpos.	72
Ilustración 52 DCL del rocker.....	82
Ilustración 53 Interacción llanta-suelo.....	87
Ilustración 54 Ángulos terreno simulación.....	89
Ilustración 55 Parámetros simulación	90
Ilustración 56 Simulación SolidWorks.....	90
Ilustración 57 Gráfica de posición de P1 en simulación	91
Ilustración 58 Gráfica de velocidad lineal de P1 en simulación.....	91
Ilustración 59 Gráfica de aceleración de P1 en simulación.....	92
Ilustración 60 Gráfica de posición angular de rocker	92
Ilustración 61 Gráfica de posición angular de bogie.....	93
Ilustración 62 Gráfica de velocidad angular de rocker.	93
Ilustración 63 Gráfica de velocidad angular de bogie.....	94
Ilustración 64 Gráfica de aceleración angular de rocker.	94
Ilustración 65 Gráfica de aceleración angular de bogie	95
Ilustración 66 Lectura inicial de los datos en MATLAB.	96
Ilustración 67 Parámetros del vehículo en MATLAB.....	97
Ilustración 68 Ángulos absolutos y relativos en MATLAB.	97
Ilustración 69 Matrices de rotación en MATLAB.	98
Ilustración 70 Posiciones de los puntos en MATLAB.	98
Ilustración 71 Velocidades de los puntos en MATLAB.....	99
Ilustración 72 Aceleraciones de los puntos en MATLAB.....	99
Ilustración 73 Creación de variables de los datos obtenidos en MATLAB.	100
Ilustración 74 Parte de la matriz A en MATLAB.	100
Ilustración 75 Parte de la matriz B en MATLAB.	101
Ilustración 76 Solución del sistema de ecuaciones y organización de los datos en MATLAB.	101
Ilustración 77 Cálculo de los torques en MATLAB.	102
Ilustración 78 Magnitudes de las fuerzas MATLAB.....	102
Ilustración 79 Valores máximos de las fuerzas MATLAB.....	103
Ilustración 80 Fuerzas máximas para el análisis de elementos finitos.	103
Ilustración 81 Código para graficar los resultados obtenidos en MATLAB.....	103
Ilustración 82 Simulación de movimiento en progreso.....	104
Ilustración 83 Simulación de movimiento finalizada.....	104
Ilustración 84 Comparativa torques simulado vs calculados.....	105

Ilustración 85 Comparativa torque calculado vs filtrado	106
Ilustración 86 Comparativa torques calculado filtrados de cada llanta.....	106
Ilustración 87 Comparativa de torques simulados de cada llanta	107
Ilustración 88 Comparativa de torques calculados de cada llanta	107
Ilustración 89 Fuerzas en el punto P1.....	108
Ilustración 90 Fuerzas en el punto P2.....	108
Ilustración 91 Fuerzas en el punto P3.....	108
Ilustración 92 Fuerzas en el punto P4.....	109
Ilustración 93 Fuerzas en el punto P5.....	109
Ilustración 94 Fuerzas en el punto P6.....	109
Ilustración 95 Fuerzas en el punto P7.....	110
Ilustración 96 Fuerzas en el punto P8.....	110
Ilustración 97 Análisis de von misses del rocker.....	111
Ilustración 98 Desplazamientos producidos en el rocker.	112
Ilustración 99 Deformaciones unitarias en el rocker.....	113
Ilustración 100 Factor de seguridad del rocker.	113
Ilustración 101 Análisis de von misses del bogie.....	115
Ilustración 102 Desplazamientos producidos en el bogie	115
Ilustración 103 Deformaciones unitarias en el bogie.....	116
Ilustración 104 Factor de seguridad del bogie	117
Ilustración 105 Análisis de von misses en la C	118
Ilustración 106 Análisis de von misses en la C	119
Ilustración 107 Deformaciones unitarias en la C.....	120
Ilustración 108 Factor de seguridad de la C.....	121
Ilustración 109 Motorreductor 12V.	123
Ilustración 110 Servomotor de 180°.....	124
Ilustración 111 Servomotor de 270°.....	124
Ilustración 112 Servomotor de 90° con set de acoples.	125
Ilustración 113 Módulo MPU6050	126
Ilustración 114 Módulo bluetooth HC-05.....	127
Ilustración 115 Módulo L298N	128
Ilustración 116 Driver VNH2SP30.....	129
Ilustración 117 Arduino mega 2560	130
Ilustración 118 Diagrama de flujo para el microcontrolador.	132
Ilustración 119 Código de Arduino comprimido.....	133
Ilustración 120 Ventana de inicio de la aplicación.....	134
Ilustración 121 Programación de la ventana principal.....	134
Ilustración 122 Ventana de control por voz.....	135
Ilustración 123 Parte 1 de la programación de la ventana de control por voz.	136
Ilustración 124 Apartado de transporte en la ventana de control por botones.	137
Ilustración 125 Apartado de ángulo de giro en la ventana de control por botones.	138
Ilustración 126 Apartado de siembra en la ventana de control por botones.....	138
Ilustración 127 Apartado de riego en la ventana de control por botones.	139
Ilustración 128 Parte 1 de la programación de la ventana de control botones.	139

Ilustración 129 Circuito electrónico	140
Ilustración 130 Conexión servomotores con el arduino.....	141
Ilustración 131 Conexión modulo bluetooth y MPU6050 con el arduino	142
Ilustración 132 Conexión drivers y motorreductores con el arduino.....	143
Ilustración 133 Vista isométrica con escualización	144
Ilustración 134 Vista superior con escualización.....	145
Ilustración 135 Vista lateral con escualización.....	145
Ilustración 136 Vista frontal con escualización.....	146
Ilustración 137 Piñones para control de placa	146
Ilustración 138 Bogie escualizado.....	147
Ilustración 139 Vista frontal con circuito energizado	147
Ilustración 140 Lámina de transporte incorporada	148
Ilustración 141 Mecanismo de dirección	149
Ilustración 142 Vehículo en modo transporte con carga en terreno – A.....	150
Ilustración 143 Vehículo en modo transporte con carga en terreno – B.....	150
Ilustración 144 Placa con carga en terreno.....	151
Ilustración 145 Altura máxima del obstáculo.....	152
Ilustración 146 Discos de siembra acoplados.	152
Ilustración 147 Vista superior discos de siembra con tolva acoplados.....	153
Ilustración 148 Vista lateral con tolva acoplada	153
Ilustración 149 Vista frontal con tolva acoplada	154
Ilustración 150 Vehículo en modo siembra con semillas en terreno	154
Ilustración 151 Mangueras del sistema de riego.....	155
Ilustración 152 Servomotor y válvula	156
Ilustración 153 Vehículo en modo riego en terreno.....	156
Ilustración 154 Sistema de mangueras externas con tanque.....	157
Ilustración 155 Página de inicio del manual del usuario.....	160
Ilustración 156 DCL del bogie	200
Ilustración 157 DCL de las c's.....	200
Ilustración 158 Parte 2 de la programación de la ventana de control por voz.	235
Ilustración 159 Parte 3 de la programación de la ventana de control por voz.	236
Ilustración 160 Parte 2 de la ventana de control por botones de la aplicación.....	237
Ilustración 161 Parte 3 de la ventana de control por botones de la aplicación.....	237
Ilustración 162 Plano pieza principal del bogie (pieza 1 del ensamble del bogie).	250
Ilustración 163 Plano de soporte de los rodamientos cónicos (pieza 2 del ensamble).	251
Ilustración 164 Plano de soporte de los rodamientos cónicos (pieza 3 del ensamble).	252
Ilustración 165 Plano de corte de tubería redonda para la camisa de las c's.....	253
Ilustración 166 Plano de ensamble de la camisa de las c's.	254
Ilustración 167 Plano de la platina para acople de los brackets de servo	255
Ilustración 168 Plano de la platina para el acople de la chumacera.....	256
Ilustración 169 Plano tapas de tubo cuadrado de 3/4".....	257
Ilustración 170 Plano de ensamble del bogie.....	258

Ilustración 171 Partes y cantidades que componen al bogie	259
Ilustración 172 Plano parte central del rocker.	260
Ilustración 173 Plano parte frontal del rocker derecho	261
Ilustración 174 Plano parte frontal del rocker izquierdo	262
Ilustración 175 Plano parte posterior del rocker.	263
Ilustración 176 Ensamble del rocker derecho con sus partes.	264
Ilustración 177 Ensamble del rocker izquierdo con sus partes.....	265
Ilustración 178 Plano del eje del rocker.	266
Ilustración 179 Plano de ensamble completo del rocker derecho	267
Ilustración 180 Partes del rocker derecho completo	268
Ilustración 181 Plano de ensamble completo del rocker izquierdo.....	269
Ilustración 182 Partes del rocker izquierdo completo.....	270
Ilustración 183 Plano de corte de varilla cuadrada de la parte 1	271
Ilustración 184 Plano de corte de varilla cuadrada de la parte 2.....	272
Ilustración 185 Plano de corte de varilla cuadrada de la parte 3.....	273
Ilustración 186 Plano de corte de varilla cuadrada de la parte 4.....	274
Ilustración 187 Plano de corte de varilla cuadrada de la parte 5.....	275
Ilustración 188 Plano de corte de varilla cuadrada de la parte 6.....	276
Ilustración 189 Plano de corte de varilla cuadrada de la parte 7	277
Ilustración 190 Plano de corte de varilla cuadrada de la parte 8.....	278
Ilustración 191 Ensamble de la c.	279
Ilustración 192 Cantidades y partes del ensamble de la c.	280
Ilustración 193 Plano del eje de la c.....	281
Ilustración 194 Plano del eje superior de la c.....	282
Ilustración 195 Planos de ensamble completo de la c.	283
Ilustración 196 Vista isométrica de los brakets de servomotor (pieza estándar). 284	
Ilustración 197 Vista isométrica de la chumacera KFL08 (pieza estándar).	285
Ilustración 198 Plano de acople del motorreductor para sujeción del mismo.....	286
Ilustración 199 Vista isométrica del motorreductor (pieza estándar).	287
Ilustración 200 Plano de corte de la lámina para la llanta parte 1	288
Ilustración 201 Plano de acople entre la llanta y el motorreductor.	289
Ilustración 202 Plano de corte de tubería para la llanta parte 3	290
Ilustración 203 Plano de cote de tubería para la llanta parte 4	291
Ilustración 204 Plano de corte de lámina para la llanta parte 5.....	292
Ilustración 205 Vista isométrica rodamiento de bola de 8milímetros (pieza estándar).	293
Ilustración 206 Ensamble de la llanta.....	294
Ilustración 207 Partes y cantidades de piezas de la llanta	295
Ilustración 208 Plano de caucho externo de la llanta	296
Ilustración 209 Ensamble de la llanta completo	297
Ilustración 210 Plano disco de siembra.....	298
Ilustración 211 Plano de engranaje de servomotor.	299
Ilustración 212 Plano de engranaje de la c.	300
Ilustración 213 Plano de engranaje de la placa.....	301
Ilustración 214 Plano de engranaje del motorreductor de la placa.....	302

Ilustración 215 Plano de buje separador de los engranajes de la c.	303
Ilustración 216 Vista isométrica del espigo (pieza estándar).....	304
Ilustración 217 Vista isométrica de la cruz (pieza estándar).	305
Ilustración 218 Ensamble de la cruz con el espigo	306
Ilustración 219 Vista isométrica de la te (pieza estándar).	307
Ilustración 220 Ensamble de te con el espigo	308
Ilustración 221 Vista isométrica del tapón (pieza estándar).	309
Ilustración 222 Ensamble del tapón con el espigo	310
Ilustración 223 Plano de la barra de la compuerta de la placa.....	311
Ilustración 224 Plano de los brakets para la placa	312
Ilustración 225 Plano del divisor de la placa	313
Ilustración 226 Plano lamina divisora de los componentes electrónicos.....	314
Ilustración 227 Plano paral de la placa	315
Ilustración 228 Plano partidor central de la placa.....	316
Ilustración 229 Plano partidor horizontal divisor interior.....	317
Ilustración 230 Plano del partidor horizontal del divisor de la placa	318
Ilustración 231 Plano del partidor lateral de la placa.....	319
Ilustración 232 Plano del partidor vertical corto del divisor de la placa	320
Ilustración 233 Plano del partidor vertical interior de la placa	321
Ilustración 234 Plano del partidor vertical largo del divisor de la placa	322
Ilustración 235 Plano de la platina de refuerzo para el eje de la placa.....	323
Ilustración 236 Plano tablero divisor de la placa	324
Ilustración 237 Plano del tablero inferior para entrada de aire a los componentes electrónicos.....	325
Ilustración 238 Plano del tablero lateral frontal de la placa	326
Ilustración 239 Plano del tablero lateral posterior de la placa	327
Ilustración 240 Plano tablero superior de la placa.....	328
Ilustración 241 Plano del travesaño de la placa	329
Ilustración 242 Plano de la pieza unión de la placa	330
Ilustración 243 Plano de la tolva de la parte frontal.....	331
Ilustración 244 Plano de la tolva de la parte lateral	332
Ilustración 245 Plano de la tolva parte inferior.	333
Ilustración 246 Plano manija de la válvula reguladora de caudal.....	334
Ilustración 247 Plano acople del motorreductor al mecanismo	335
Ilustración 248 Plano de soporte del sistema de control de riego (válvula y servomotor).....	336
Ilustración 249 Plano vista explosionada de la parte lateral de la placa.....	337
Ilustración 250 Plano vista explosionada de la placa con sus partes.....	338
Ilustración 251 Planos de los tableros de la placa	339

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Condiciones idóneas para cultivar Cebolla Junca.....	30
Tabla 2 Altura de semillas a sembrar.....	47
Tabla 3 Alturas de planta con surco.....	49
Tabla 4 Listado de siglas.	67
Tabla 5 Parámetros de distancia con su significado	72
Tabla 6 Resumen del resultado F.E.A. para el rocker.....	114
Tabla 7 Resumen del resultado F.E.A. para el bogie.....	117
Tabla 8 Resumen del resultado F.E.A. para C's	121
Tabla 9 Factores de seguridad de los cuerpos.	122
Tabla 10 Características del motorreductor.	123
Tabla 11 Características servomotor MG995 de 180°	124
Tabla 12 Características servomotor MG995 de 270°	125
Tabla 13 Características servomotor MG995 de 90°	125
Tabla 14 Características módulo MPU6050.....	126
Tabla 15 Características módulo bluetooth.....	127
Tabla 16 Características driver de motores L298N	128
Tabla 17 Tabla de verdad salida motor A.	128
Tabla 18 Tabla de verdad salida motor B.	129
Tabla 19 Características driver VNH2SP30	129
Tabla 20 Características del arduino mega 2560.....	130
Tabla 21 Comandos por voz reconocibles en la aplicación.....	136
Tabla 22 Costo de componentes electrónicos y eléctricos.	158
Tabla 23 Costos de materiales.	159

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1 Fuerza resultante	35
Ecuación 2 Momento resultante.....	36
Ecuación 3 Relación de velocidad general	37
Ecuación 4 Relación de aceleración general	37
Ecuación 5 Suma de velocidades angulares.	38
Ecuación 6 Derivada cinemática.....	38
Ecuación 7 Aceleración angular.....	39
Ecuación 8 Ángulo para la obtención del punto de contacto de la fuerza puntual.	40
Ecuación 9 Fuerza necesaria para mover la rueda.....	41
Ecuación 10 Torque necesario para mover la rueda.....	42
Ecuación 11 Fuerzas reactivas en rotación inminente	42
Ecuación 12 Equivalencia entre casos cuando θ es menor igual que 10°	42
Ecuación 13 Equivalencia entre casos cuando θ es mayor que 10°	42
Ecuación 14 Matriz de rotación de P a A.	73
Ecuación 15 Matriz de rotación de A a B.	73
Ecuación 16 Matriz de rotación de B a C.....	73
Ecuación 17 Matriz de rotación de B a E.	73
Ecuación 18 Matriz de rotación de A a G.....	73
Ecuación 19 Matriz de rotación de A a P.	73
Ecuación 20 Matriz de rotación de B a A.	73
Ecuación 21 Matriz de rotación de C a B.....	74
Ecuación 22 Matriz de rotación de E a B.	74
Ecuación 23 Matriz de rotación de G a A.....	74
Ecuación 24 Punto P_0	74
Ecuación 25 Punto P_1	74
Ecuación 26 Punto P_2	74
Ecuación 27 Punto P_3	74
Ecuación 28 Punto P_4	74
Ecuación 29 Punto P_5	74
Ecuación 30 Punto P_6	74
Ecuación 31 Punto P_7	74
Ecuación 32 Punto P_8	74
Ecuación 33 Ubicación del centroide del cuerpo A medido desde P_0	74
Ecuación 34 Ubicación del centroide del cuerpo B medido desde P_0	74
Ecuación 35 Ubicación del centroide del cuerpo C medido desde P_0	75
Ecuación 36 Ubicación del centroide del cuerpo E medido desde P_0	75
Ecuación 37 Ubicación del centroide del cuerpo G medido desde P_0	75
Ecuación 38 Posición del punto P_0 al punto P_1	75
Ecuación 39 Posición del punto P_1 al punto P_2	75
Ecuación 40 Posición del punto P_2 al punto P_3	75
Ecuación 41 Posición del punto P_2 al punto P_4	75

Ecuación 42 Posición del punto P1 al punto P5.....	75
Ecuación 43 Posición del punto P4 al punto P6.....	75
Ecuación 44 Posición del punto P3 al punto P7.....	75
Ecuación 45 Posición del punto P5 al punto P8.....	75
Ecuación 46 Posición del punto PA * al punto P1	76
Ecuación 47 Posición del punto PA * al punto P2.....	76
Ecuación 48 Posición del punto PA * al punto P5.....	76
Ecuación 49 Posición del punto PB * al punto P2.....	76
Ecuación 50 Posición del punto PB * al punto P3.....	76
Ecuación 51 Posición del punto PB * al punto P4.....	76
Ecuación 52 Posición del punto PC * al punto P4.....	76
Ecuación 53 Posición del punto PC * al punto P6.....	76
Ecuación 54 Posición del punto PE * al punto P3.....	76
Ecuación 55 Posición del punto PE * al punto P7.....	76
Ecuación 56 Posición del punto PG * al punto P5.....	76
Ecuación 57 Posición del punto PG * al punto P8.....	76
Ecuación 58 Velocidad del punto P0 vista desde el sistema newtoniano en base P.	77
Ecuación 59 Velocidad del punto P1 vista desde el sistema newtoniano en base A.	77
Ecuación 60 Velocidad del punto P2 vista desde el sistema newtoniano en base B.	77
Ecuación 61 Velocidad del punto P3 vista desde el sistema newtoniano en base B.	77
Ecuación 62 Velocidad del punto P4 vista desde el sistema newtoniano en base C.	77
Ecuación 63 Velocidad del punto P6 vista desde el sistema newtoniano en base C.	78
Ecuación 64 Velocidad del punto P3 vista desde el sistema newtoniano en base E.	78
Ecuación 65 Velocidad del punto P7 vista desde el sistema newtoniano en base E.	78
Ecuación 66 Velocidad del punto P5 vista desde el sistema newtoniano en base G.	78
Ecuación 67 Velocidad del punto P8 vista desde el sistema newtoniano en base G.	78
Ecuación 68 Aceleración del punto P0 vista desde el sistema newtoniano en base P.	78
Ecuación 69 Aceleración del punto P1 vista desde el sistema newtoniano en base A.	79
Ecuación 70 Aceleración del punto P2 vista desde el sistema newtoniano en base B.	79
Ecuación 71 Aceleración del punto P3 vista desde el sistema newtoniano en base B.	79

Ecuación 72 Aceleración del punto P4 vista desde el sistema newtoniano en base B.	79
Ecuación 73 Aceleración del punto P5 vista desde el sistema newtoniano en base A.	79
Ecuación 74 Aceleración del punto P3 vista desde el sistema newtoniano en base E.	80
Ecuación 75 Aceleración del punto P7 vista desde el sistema newtoniano en base E.	80
Ecuación 76 Aceleración del punto P4 vista desde el sistema newtoniano en base C.	80
Ecuación 77 Aceleración del punto P6 vista desde el sistema newtoniano en base C.	80
Ecuación 78 Aceleración del punto P5 vista desde el sistema newtoniano en base G.	81
Ecuación 79 Aceleración del punto P8 vista desde el sistema newtoniano en base G.	81
Ecuación 80 Sumatoria de fuerzas del rocker.	82
Ecuación 81 Sumatoria de fuerzas de rocker en x.	82
Ecuación 82 Sumatoria de fuerzas de rocker en y.	82
Ecuación 83 Sumatoria de fuerzas de rocker en z.	82
Ecuación 84 Sumatoria de momentos del rocker.	82
Ecuación 85 Sumatoria de momentos de rocker en x.	83
Ecuación 86 Sumatoria de momentos de rocker en y.	83
Ecuación 87 Sumatoria de momentos de rocker en z.	83
Ecuación 88 Sistema de ecuaciones de manera matricial.	83
Ecuación 89 Solución sistema de ecuaciones matricialmente.	84
Ecuación 90 Matriz A.	85
Ecuación 91 Matriz B.	86
Ecuación 92 Palanca antirrodadura.	88
Ecuación 93 Ángulo entre la vertical y la fuerza N_j	88
Ecuación 94 Sumatoria de fuerzas en x igual a cero.	88
Ecuación 95 Resultado de la sumatoria de fuerzas en x.	88
Ecuación 96 Sumatoria de fuerzas en y igual a cero.	88
Ecuación 97 Resultado de la sumatoria de fuerzas en y.	88
Ecuación 98 Sumatoria de momentos igual a cero.	88
Ecuación 99 Resultado de la sumatoria de momentos.	88
Ecuación 100 Despeje del torque.	89
Ecuación 101 Velocidad del punto O vista desde el sistema newtoniano en base P.	170
Ecuación 102 Uso de la ecuación 3 para hallar la velocidad de P1.	170
Ecuación 103 Resultado del segundo término de la ecuación 88.	171
Ecuación 104 Velocidad angular del cuerpo RA vista desde el sistema newtoniano.	171
Ecuación 105 Resultado del tercer término de la ecuación 88.	171

Ecuación 106 Velocidad del punto P1 vista desde el sistema newtoniano en base P.	171
Ecuación 107 Velocidad del punto P1 vista desde el sistema newtoniano en base A.	171
Ecuación 108 Velocidad del punto P1 vista desde el sistema newtoniano en base A – Ordenada	172
Ecuación 109 Uso de la ecuación 3 para hallar la velocidad de P2	172
Ecuación 110 Resultado del tercer término de la ecuación 95.	172
Ecuación 111 Resultado del tercer término de la ecuación 95 – Organizada	172
Ecuación 112 Velocidad del punto P2 vista desde el sistema newtoniano en base A – Organizada	172
Ecuación 113 Uso de la ecuación 3 para hallar la velocidad de P5	173
Ecuación 114 Resultado del tercer término de la ecuación 99.	173
Ecuación 115 Resultado del tercer término de la ecuación 99 – Organizada	173
Ecuación 116 Velocidad del punto P5 vista desde el sistema newtoniano en base A – Organizada	173
Ecuación 117 Velocidad del punto P2 vista desde el sistema newtoniano en base B.	173
Ecuación 118 Velocidad del punto P2 vista desde el sistema newtoniano en base B – Organizada	174
Ecuación 119 Uso de la ecuación 3 para hallar la velocidad de P3	174
Ecuación 120 Resultado del segundo término de la ecuación 105	174
Ecuación 121 Resultado del segundo término de la ecuación 105 – Organizada.	174
Ecuación 122 Velocidad del punto P3 vista desde el sistema newtoniano en base C – Organizada	174
Ecuación 123 Uso de la ecuación 3 para hallar la velocidad de P3	174
Ecuación 124 Resultado del segundo término de la ecuación 109	175
Ecuación 125 Resultado del segundo término de la ecuación 109 – Organizada.	175
Ecuación 126 Velocidad del punto P4 vista desde el sistema newtoniano en base B – Organizada	175
Ecuación 127 Velocidad del punto P4 vista desde el sistema newtoniano en base C.	175
Ecuación 128 Velocidad del punto P4 vista desde el sistema newtoniano en base C – Organizada	176
Ecuación 129 Uso de la ecuación 3 para hallar la velocidad de P3	176
Ecuación 130 Resultado del segundo término de la ecuación 115	176
Ecuación 131 Velocidad del punto P6 vista desde el sistema newtoniano en base C.	176
Ecuación 132 Velocidad del punto P3 vista desde el sistema newtoniano en base E.	176
Ecuación 133 Velocidad del punto P3 vista desde el sistema newtoniano en base E – Organizada	177

Ecuación 134 Velocidad del punto P5 vista desde el sistema newtoniano en base G.....	177
Ecuación 135 Velocidad del punto P5 vista desde el sistema newtoniano en base G – Organizada	177
Ecuación 136 Velocidad del punto P7 vista desde el sistema newtoniano en base E.	177
Ecuación 137 Velocidad del punto P8 vista desde el sistema newtoniano en base G.....	177
Ecuación 138 Velocidad del punto P6 vista desde el sistema newtoniano en base D.	178
Ecuación 139 Velocidad del punto P6 vista desde el sistema newtoniano en base D – Organizada	178
Ecuación 140 Velocidad del punto P7 vista desde el sistema newtoniano en base F.	179
Ecuación 141 Velocidad del punto P7 vista desde el sistema newtoniano en base F – Organizada	179
Ecuación 142 Velocidad del punto P8 vista desde el sistema newtoniano en base H.	179
Ecuación 143 Velocidad del punto P8 vista desde el sistema newtoniano en base H – Organizada	180
Ecuación 144 Aceleración del punto P0 vista desde el sistema newtoniano en base P.	180
Ecuación 145 Uso de la ecuación 4 para hallar la aceleración del punto P1	180
Ecuación 146 Resultado del segundo término de la ecuación 131	180
Ecuación 147 Aceleración angular vista desde el sistema newtoniano.....	181
Ecuación 148 Resultado del tercer término de la ecuación 131.....	181
Ecuación 149 Resultado del cuarto término de la ecuación 131.....	181
Ecuación 150 Resultado del quinto término de la ecuación 131.....	181
Ecuación 151 Aceleración del punto P1 vista desde el sistema newtoniano en base P.	181
Ecuación 152 Aceleración del punto P1 vista desde el sistema newtoniano en base A.	181
Ecuación 153 Aceleración del punto P1 vista desde el sistema newtoniano en base A – Organizada.....	181
Ecuación 154 Uso de la ecuación 4 para hallar la aceleración del punto P2	182
Ecuación 155 Resultado del segundo término de la ecuación 140	182
Ecuación 156 Resultado del segundo término de la ecuación 140 – Organizada.	182
Ecuación 157 Resultado del tercer término de la ecuación 140.....	182
Ecuación 158 Resultado del tercer término de la ecuación 140 – Organizada	182
Ecuación 159 Aceleración del punto P2 vista desde el sistema newtoniano en base A.	182
Ecuación 160 Aceleración del punto P2 vista desde el sistema newtoniano en base A – Organizada.....	183
Ecuación 161 Uso de la ecuación 4 para hallar la aceleración del punto P5	183

Ecuación 162 Resultado del segundo término de la ecuación 147	183
Ecuación 163 Resultado del segundo término de la ecuación 147 – Organizada.	183
Ecuación 164 Resultado del tercer término de la ecuación 147.....	183
Ecuación 165 Resultado del tercer término de la ecuación 147 – Organizada	183
Ecuación 166 Aceleración del punto P5 vista desde el sistema newtoniano en base A.	184
Ecuación 167 Aceleración del punto P5 vista desde el sistema newtoniano en base A – Organizada.....	184
Ecuación 168 Aceleración del punto P2 vista desde el sistema newtoniano en base B.	184
Ecuación 169 Aceleración del punto P2 vista desde el sistema newtoniano en base B – Organizada.....	184
Ecuación 170 Uso de la ecuación 4 para hallar la aceleración del punto P3	185
Ecuación 171 Resultado del segundo término de la ecuación 157	185
Ecuación 172 Resultado del segundo término de la ecuación 157 – Organizada.	185
Ecuación 173 Resultado del tercer término de la ecuación 157.....	185
Ecuación 174 Resultado del tercer término de la ecuación 157 – Organizada	185
Ecuación 175 Aceleración del punto P3 vista desde el sistema newtoniano en base B – Organizada.....	186
Ecuación 176 Uso de la ecuación 4 para hallar la aceleración del punto P4	186
Ecuación 177 Resultado del segundo término de la ecuación 163	186
Ecuación 178 Resultado del segundo término de la ecuación 163 – Organizada.	186
Ecuación 179 Resultado del tercer término de la ecuación 163.....	186
Ecuación 180 Resultado del tercer término de la ecuación 163 – Organizada	186
Ecuación 181 Aceleración del punto P4 vista desde el sistema newtoniano en base B – Organizada.....	187
Ecuación 182 Aceleración del punto P3 vista desde el sistema newtoniano en base E.	187
Ecuación 183 Aceleración del punto P3 vista desde el sistema newtoniano en base E – Organizada.....	188
Ecuación 184 Aceleración del punto P4 vista desde el sistema newtoniano en base C.	188
Ecuación 185 Aceleración del punto P4 vista desde el sistema newtoniano en base C – Organizada.....	189
Ecuación 186 Aceleración del punto P5 vista desde el sistema newtoniano en base G.....	189
Ecuación 187 Aceleración del punto P5 vista desde el sistema newtoniano en base G – Organizada.....	189
Ecuación 188 Uso de la ecuación 4 para hallar la aceleración del punto P4	189
Ecuación 189 Resultado del segundo término de la ecuación 177	189
Ecuación 190 Resultado del tercer término de la ecuación 177.....	189

Ecuación 191 Aceleración del punto P6 vista desde el sistema newtoniano en base C.....	190
Ecuación 192 Aceleración del punto P7 vista desde el sistema newtoniano en base E.....	190
Ecuación 193 Aceleración del punto P8 vista desde el sistema newtoniano en base G.....	190
Ecuación 194 Vector posición del centroide de cuerpo RA a P1	190
Ecuación 195 Vector posición del centroide de cuerpo RC a P4	190
Ecuación 196 Vector posición del centroide RE a P3	190
Ecuación 197 Vector posición del centroide RG a P5.....	190
Ecuación 198 Uso de la ecuación 3 para hallar velocidad del centroide de RA.	191
Ecuación 199 Velocidad angular del centroide de RA vista desde el sistema newtoniano	191
Ecuación 200 Resultado del segundo término de la ecuación 186	191
Ecuación 201 Velocidad del centroide del cuerpo RA vista desde el sistema newtoniano	191
Ecuación 202 Velocidad del centroide del cuerpo RA vista desde el sistema newtoniano – Organizada	191
Ecuación 203 Velocidad del centroide del cuerpo RB vista desde el sistema newtoniano	192
Ecuación 204 Uso de la ecuación 3 para hallar velocidad del centroide de RC... ..	192
Ecuación 205 Velocidad angular del centroide de RC vista desde el sistema newtoniano	192
Ecuación 206 Resultado del segundo término de la ecuación 192	192
Ecuación 207 Velocidad del centroide del cuerpo RC vista desde el sistema newtoniano	192
Ecuación 208 Velocidad del centroide del cuerpo RC vista desde el sistema newtoniano – Organizada	193
Ecuación 209 Uso de la ecuación 3 para hallar velocidad del centroide de RE.	193
Ecuación 210 Velocidad angular del centroide de RC vista desde el sistema newtoniano	193
Ecuación 211 Resultado del segundo término de la ecuación 197	193
Ecuación 212 Velocidad del centroide del cuerpo RC vista desde el sistema newtoniano – Organizada	194
Ecuación 213 Uso de la ecuación 3 para hallar velocidad del centroide de RG	194
Ecuación 214 Velocidad angular del centroide de RG vista desde el sistema newtoniano	194
Ecuación 215 Resultado del segundo término de la ecuación 201	194
Ecuación 216 Velocidad del centroide del cuerpo RG vista desde el sistema newtoniano – Organizada	194
Ecuación 217 Uso de la ecuación 4 para hallar la aceleración del centroide de RA.	195
Ecuación 218 Resultado del segundo término de la ecuación 205	195
Ecuación 219 Resultado del segundo término de la ecuación 205 – Organizada.	195

Ecuación 220 Resultado del tercer término de la ecuación 205.....	195
Ecuación 221 Resultado del tercer término de la ecuación 205 – Organizada	196
Ecuación 222 Aceleración del centroide del cuerpo RA vista desde el sistema newtoniano – Organizada.....	196
Ecuación 223 Aceleración del centroide del cuerpo RB vista desde el sistema newtoniano	196
Ecuación 224 Uso de la ecuación 4 para hallar la aceleración del centroide de RC.	196
Ecuación 225 Resultado del segundo término de la ecuación 212.....	196
Ecuación 226 Resultado del segundo término de la ecuación 212 – Organizada.	196
Ecuación 227 Resultado del tercer término de la ecuación 212.....	197
Ecuación 228 Resultado del tercer término de la ecuación 212 – Organizada	197
Ecuación 229 Aceleración del centroide del cuerpo RC – Organizada.....	197
Ecuación 230 Uso de la ecuación 4 para hallar la aceleración del centroide de RE.	197
Ecuación 231 Resultado del segundo término de la ecuación 218.....	197
Ecuación 232 Resultado del segundo término de la ecuación 218 – Organizada.	198
Ecuación 233 Resultado del tercer término de la ecuación 218.....	198
Ecuación 234 Resultado del tercer término de la ecuación 218 – Organizada	198
Ecuación 235 Aceleración del centroide del cuerpo RE vista desde el sistema newtoniano – Organizada.....	198
Ecuación 236 Uso de la ecuación 4 para hallar la aceleración del centroide de RG.	198
Ecuación 237 Resultado del segundo término de la ecuación 224.....	199
Ecuación 238 Resultado del segundo término de la ecuación 224 – Organizada.	199
Ecuación 239 Resultado del tercer término de la ecuación 224.....	199
Ecuación 240 Resultado del tercer término de la ecuación 224 – Organizada	199
Ecuación 241 Aceleración del centroide del cuerpo RG vista desde el sistema newtoniano – Organizada.....	199
Ecuación 242 Sumatoria de fuerzas del bogie.....	201
Ecuación 243 Sumatoria de fuerzas de bogie en x.	201
Ecuación 244 Sumatoria de fuerzas de bogie en y.	201
Ecuación 245 Sumatoria de fuerzas de bogie en z.	201
Ecuación 246 Sumatoria de fuerzas de la c de nombre E.	201
Ecuación 247 Sumatoria de fuerzas de la c de nombre E en x.....	201
Ecuación 248 Sumatoria de fuerzas de la c de nombre E en y.....	201
Ecuación 249 Sumatoria de fuerzas de la c de nombre E en z.....	201
Ecuación 250 Sumatoria de fuerzas de la c de nombre C.....	202
Ecuación 251 Sumatoria de fuerzas de la c de nombre C en x.....	202
Ecuación 252 Sumatoria de fuerzas de la c de nombre C en y.....	202
Ecuación 253 Sumatoria de fuerzas de la c de nombre C en z.....	202
Ecuación 254 Sumatoria de fuerzas de la c de nombre G.....	202

Ecuación 255	Sumatoria de fuerzas de la c de nombre G en x.	202
Ecuación 256	Sumatoria de fuerzas de la c de nombre G en y.	202
Ecuación 257	Sumatoria de fuerzas de la c de nombre G en z.	202
Ecuación 258	Sumatoria de momentos del bogie.....	203
Ecuación 259	Sumatoria de momentos de bogie en x.....	203
Ecuación 260	Sumatoria de momentos de bogie en y.....	203
Ecuación 261	Sumatoria de momentos de bogie en z.....	203
Ecuación 262	Sumatoria de momentos de la c de nombre C	203
Ecuación 263	Sumatoria de momentos de la c de nombre C en x.....	204
Ecuación 264	Sumatoria de momentos de la c de nombre C en y.....	204
Ecuación 265	Sumatoria de momentos de la c de nombre C en z.....	204
Ecuación 266	Sumatoria de momentos de la c de nombre E.	204
Ecuación 267	Sumatoria de momentos de la c de nombre E en x.....	204
Ecuación 268	Sumatoria de momentos de la c de nombre E en y.....	205
Ecuación 269	Sumatoria de momentos de la c de nombre E en z.....	205
Ecuación 270	Sumatoria de momentos de la c de nombre G	205
Ecuación 271	Sumatoria de momentos de la c de nombre G en x.	205
Ecuación 272	Sumatoria de momentos de la c de nombre G en y.	205
Ecuación 273	Sumatoria de momentos de la c de nombre G en z.	206

Bucaramanga 28 de junio del 2021

DEDICATORIA

Es nuestro deseo como sencillo gesto de agradecimiento, dedicarle nuestro trabajo de grado plasmado en el presente informe, a Dios por permitir que todo saliera de la mejor manera posible bajo su guía, a nuestras familias por su paciencia y por brindarnos esa energía necesaria para terminar nuestro objetivo y, a nuestras parejas quienes nos motivaron a seguir adelante cuando pensábamos en renunciar.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, queremos agradecer a Dios, quien nos dio el conocimiento, fuerzas y entendimiento para llegar hasta este punto sin decaer en el camino.

En segundo lugar, queremos agradecer a todos nuestros compañeros y a nuestras familias, por apoyarnos aun cuando nuestros ánimos decaían. En especial, queremos hacer mención de nuestros padres: Marcelino Bohórquez y Jeanny Guerra, Guillermo Carrasquilla y Melfy Mercado, Jairo Carvajal y Gladys Pulido; nuestros hermanos: Marina Bohórquez, Eduardo Carrasquilla y Ferney Carreño; nuestras parejas: Yenny Rodríguez y Verónica Peñalosa; y a toda persona que llegó a involucrarse directa o indirectamente en nuestro proyecto.

También queremos agradecer a los campesinos de Berlín, quienes nos abrieron las puertas de sus hogares con amabilidad y diligencia para que todo esto fuese posible.

Por último, queremos agradecer a nuestro director Sebastián Roa, PhD y a nuestro codirector M. Sc. Camilo Moncada, quienes con sus conocimientos y apoyo nos guiaron a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que esperábamos.

Muchas gracias a todos.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria agrícola el transporte de la cosecha producida por lo general lo realiza el encargado de cortarlo, en cultivos donde el espacio entre planta y planta es muy reducido por lo que se hace poco probable que el fruto pueda ser extraído del cultivo por medio de ayuda animal, por tal motivo el encargado de cortar el producto debe retirarlo de la plantación, esta labor generalmente suele ser repetitiva y dolorosa, debido a que los agricultores presentan problemas en la zona lumbar baja, agregando a esto que, el producto se encuentra expuesto a sufrir maltrato.

No se les podría decir a los campesinos que la solución a la problemática de dolores en sus cuerpos, es dejar de cultivar; básicamente, tendrían que dejar de trabajar y de llevar el sustento a sus familias para que ellos mejoren. Dicha posible solución no es óptima para mejorar su calidad de vida, por lo que no es razonable decirles esto.

Esta problemática fue la que impulsó la realización de este proyecto, que está encaminado al transporte de productos recolectados en el sector agrícola, particularmente en los cultivos de cebolla larga, por esto, se necesita una solución que sea capaz de movilizarse en zonas irregulares sin realizar mayores daños a los cultivos en general. Mediante este proyecto se logrará aliviar la carga laboral de las personas que trabajan en este sector tanto cargando bultos, como en la parte de riego y fumigación en el cultivo, evitando que usen fumigadoras nebulizadoras; esto con el fin de proporcionar una mejor calidad de vida a los campesinos de Berlín, Santander.

La solución planteada consiste en un vehículo con un sistema tipo rover que representará una ayuda de forma cooperativa para los campesinos en sus labores del campo. El fin de este proyecto no es desplazar al campesino ni dejarlo sin trabajo, sino, ayudarlo en su labor para hacer que éste no salga afectado de manera negativa después de haber realizado sus labores.

En el siguiente documento se encontrará todo lo desarrollado en relación a este proyecto, como el diseño de la posible solución, incluyendo las piezas principales que permitirán su funcionamiento, así como, cálculos matemáticos, programación general para su control, diseño electrónico, etc.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un prototipo a escala tipo rover para el transporte de carga, siembra y fumigación en cultivos en terrenos irregulares garantizando que el cultivo no sufra daños mientras se realizan las labores.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un prototipo a escala con un mecanismo tipo rover para la siembra, riego y transporte en cultivos.
- Realizar el modelo matemático del vehículo para cálculos cinemáticos, dinámicos y de esfuerzo.
- Desarrollar el sistema electrónico para implementarlo en el prototipo diseñado con el fin de realizar el accionamiento, monitoreo y control vehículo.
- Construir el vehículo teniendo en cuenta los diseños previamente realizados.
- Validar el funcionamiento del vehículo.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. CULTIVOS DE CEBOLLA

La cebolla de rama ha sido uno de los principales cultivos en China y Japón, en donde se ha cultivado durante más de 2000 años, manteniendo actualmente su gran importancia. A Colombia fue introducida por los españoles, y desde hace aproximadamente 50 años se han desarrollado los cultivos comerciales.¹

En promedio una planta de cebolla de rama puede producir entre 1,8 y 2,2 kilogramos de pseudotallos² al momento de la cosecha, dependiendo del manejo que se haya dado y del periodo vegetativo en el que se encuentre el cultivo. La siguiente grafica muestra la producción anual por toneladas en los 7 departamentos de mayor producción.³

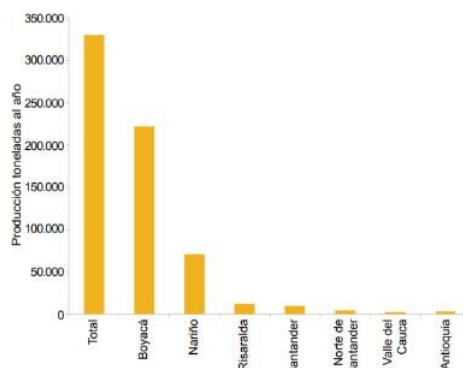


Ilustración 1 Producción anual en toneladas Fuente: DANE, ENA 2014.

En Colombia no existen variedades mejoradas de cebolla de rama, por lo cual se siembran únicamente materiales regionales. De la zona de Aquitania se pueden nombrar los siguientes: Junca, Monguana o Imperial, Berlinera, Pastusa, Chava y Santa Isabel o R18.⁴

¹ Pinzón Ramírez, Hernán; Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica); Asociación Hortifrutícola de Colombia (Asohofrucol). (agosto de 2004). Conecta Rural. Recuperado el 5 de 08 de 2019, de https://repository.agrosavia.co/bitstream/20.500.12324/2121/1/41284_27373.pdf

² Pseudotallos: Conjunto de vainas de las hojas que forman el pseudotallo o falso tallo, a través del cual van emergiendo las hojas más nuevas.

³ Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (mayo de 2015). DANE. Recuperado el 5 de agosto de 2019, de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos_may_2015.pdf

⁴ Pinzón Ramírez, Hernán; Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica); Asociación Hortifrutícola de Colombia (Asohofrucol). (agosto de 2004). Conecta Rural. Recuperado el 5 de 08 de 2019, de https://repository.agrosavia.co/bitstream/20.500.12324/2121/1/41284_27373.pdf

Las condiciones idóneas para el desarrollo de los cultivos de cebolla junca son:

Tabla 1 Condiciones idóneas para cultivar Cebolla Junca.

Temperatura	11 - 20°C
Altura sobre el nivel del mar	1.500 - 3.000 metros
Tipo de Suelo	Media franca (F) a Franco-arcillosa (FAR), profundos, con alta retención de humedad y de medio a alto contenido de materia orgánica, ligeramente ácidos a neutros con pH 6, 2 – 7, 3 y no salinos

Fuente: Corpoica y Asohofrucol, 2004, y Corpoica, 2007

3.2. ESTABLECIMIENTO Y MANEJO DEL CULTIVO

Preparación del Terreno: En terrenos planos o ligeramente planos, la preparación del suelo se puede adelantar mediante el uso de tractores livianos y el número de pases de arada y de rastrillada dependerá del cultivo o del uso anterior. En los lotes moderados a fuertemente pendientes y húmedos, la preparación se puede realizar con bueyes o con azadón.

Siembra: Las distancias de siembra están estrechamente relacionadas con la pendiente del lote, la fertilidad del suelo y el macollamiento⁵ del material regional a utilizar para el cultivo. En suelos con pendientes pronunciadas o de fertilidad natural baja se recomiendan distancias menores.

Fertilización: Dos nutrientes esenciales en la producción y en la calidad de las plantas de cebolla de rama son el nitrógeno (N) y el azufre (S), sin descartar la importancia del potasio (K), el calcio (Ca) y el fósforo (P). El abuso de fertilizantes es contraproducente porque favorece a la bacteria *Burkholderia cepaci*.

Riego: El cultivo de la cebolla de rama demanda cantidades importantes de agua para sus procesos metabólicos, los cuales se ven reflejados en un buen desarrollo, crecimiento, producción y calidad del producto; se puede llegar a un consumo directo de una lámina de agua cercana a los 600 milímetros anuales o el equivalente a 6.000 metros cúbicos por hectárea al año.

Control de malezas: Con esta práctica se busca mantener una población mínima de malezas, con lo que se evita la proliferación de plagas y enfermedades, el exceso de humedad en el cultivo y la competencia por nutrientes. Al no realizar un manejo oportuno de malezas, se permite la floración y producción de semillas, lo que facilitaría su proliferación, afectando fuertemente al cultivo.

⁵ Macollamiento: etapa del cultivo en la cual se incrementa el número de brotes o pseudotallos después de la germinación o corte.

Control de plagas: Dentro de las plagas más comunes que atacan a la cebolla de rama, se tienen las chisas, los trozadores o tierreros, las babosas y caracoles, las moscas de la raíz de la cebolla, los trips y el minador de la cebolla.

Control de enfermedades: Las principales enfermedades presentes en las zonas de producción y reconocidas en la actualidad afectan los diversos órganos de las plantas de cebolla de rama. Entre las enfermedades que causan mayor daño se pueden mencionar las siguientes: • Mildeo veloso (*Peronospora destructor*), Mancha púrpura o alternaria (*Alternaria porri.*, *Alternaria Nees*), Damping-off. Complejo fungoso, que puede estar integrado por *Pythium Nees*; *Fusarium oxysporum*, *Schlecht*; *Fusarium solani* (Mart.) Sacc; *Rhizoctonia solani* J. G. Kühn y *Sclerotium Tode*.⁶

3.3. PERÍODO VEGETATIVO DEL CULTIVO

En el primer corte se produce la cebolla de mejor calidad, con 39 toneladas por hectárea en promedio; mientras que en el segundo y tercer corte los rendimientos pasan a 37,5 y 28,75 toneladas por hectárea, respectivamente, con una menor calidad.⁷

3.4. ROBOT INDUSTRIAL

Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas.

Clasificación de los robots industriales:

- Robot secuencial.
- Robot de trayectoria controlable.
- Robot adaptativo.
- Robot tele manipulado.

⁶ Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (mayo de 2015). DANE. Recuperado el 5 de agosto de 2019, de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos_may_2015.pdf

⁷ Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2001). DANE. Recuperado el 2 de agosto de 2019, de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/Cebolla_Boyaca_Reg_Laguna_Tota.pdf

Los robots teleoperados son definidos por la NASA (1978) como: Dispositivos robóticos con brazos manipuladores y sensores y cierto grado de movilidad, controlados remotamente por un operador humano de manera directa o a través de un ordenador.⁸

3.5. VEHÍCULO TIPO ROVER

Un vehículo pequeño que puede moverse sobre terreno irregular, a menudo utilizado en la superficie de otros planetas, a veces controlado desde la tierra.⁹

3.5.1. SISTEMA DE SUSPENSIÓN ROCKER BOGIE

El sistema de suspensión Rocker-Bogie, tiene dos juntas basculantes denominadas Rocker en inglés y están unidas mediante un diferencial. En uno de los extremos de cada brazo basculante existe un elemento que pivota en un punto, el mismo que es conocido con el nombre de Bogie.¹⁰

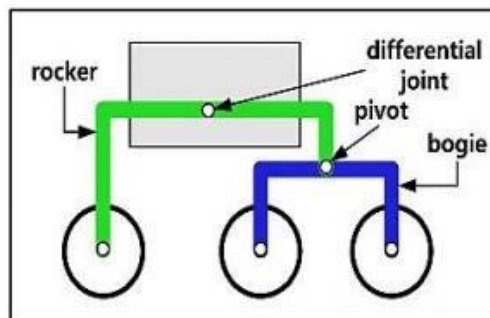


Ilustración 2 Partes del rocker bogie.

3.5.2. SOLERO

(Rover de exploración con energía solar) es el nombre de un Rover construido en un estudio realizado conjuntamente por el Instituto Federal Suizo de Tecnología de

⁸ Barrientos, A., Peñon, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (1997). Fundamentos de Robótica. Madrid, España: McGRAW W-HILL. Recuperado el 5 de agosto de 2019

⁹ Cambridge University press. (s.f.). Cambridge Dictionary. Recuperado el 6 de agosto de 2019, de <https://dictionary.cambridge.org/es/diccionario/ingles/rover>

¹⁰ Quezada Cepeda, D. P. (abril de 2014). Repositorio Institucional de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Recuperado el agosto de 2019, de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/8169>

Lausana (EPFL), Suiza, y von Hoerner & Sulger GmbH (vH & S), Alemania, bajo un contrato de la Agencia Espacial Europea (ESA). El objetivo de esta actividad era desarrollar un diseño de sistema para un sistema de un Rover para la exploración regional, que incluía un tablero para la demostración de capacidades de locomoción, acomodación de la carga útil, suministro de energía y control.¹¹

La característica más destacada del rover SOLERO es su capacidad para operar dependiendo de la energía solar recién generada, es decir, con un uso mínimo de baterías (solo para contingencias o demandas de potencia máxima). Varios vehículos que funcionan con energía solar funcionan en este modo en la Tierra.¹²

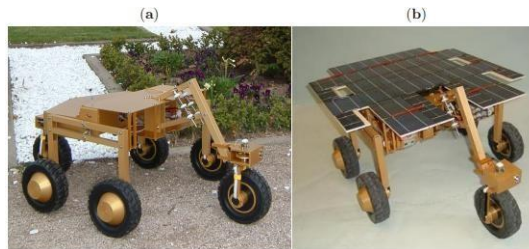


Ilustración 3 Solero con panel solar.

a) Estructura mecánica SOLERO sin sensores.

b) Prototipo equipado con panel solar, tablero de administración de energía y carga científica.

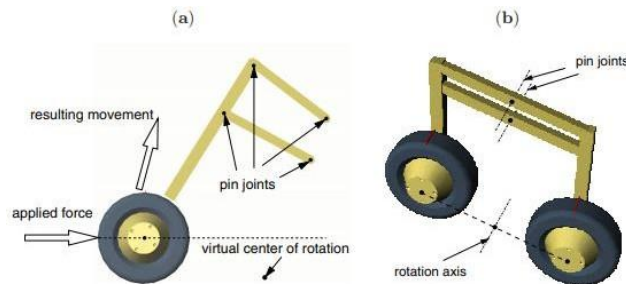


Ilustración 4 Partes del solero.

a) Horquilla delantera cinemática. Porque el centro de rotación instantánea se coloca debajo del eje de la rueda, la horquilla se pliega pasivamente para escalar un obstáculo.

b) Bogie paralelo con su eje de rotación virtual colocado entre las ruedas.

¹¹ N., N. (s.f.). The SOLERO Rover. Springer Tracts in Advanced Robotics, 43. Obtenido de https://link-springer-com.aure.unab.edu.co/content/pdf/10.1007%2F978-3-540-78287-2_2.pdf

¹² N., N. (s.f.). The SOLERO Rover. Springer Tracts in Advanced Robotics, 43. Obtenido de https://link-springer-com.aure.unab.edu.co/content/pdf/10.1007%2F978-3-540-78287-2_2.pdf

3.5.3. NANOKHOD

El rover Nanokhod es un sistema eficiente de carga útil que se puede usar para enviar una cantidad máxima de carga a una superficie planetaria con la masa mínima del rover. La alta relación entre la carga útil y la masa total de aproximadamente 0.27 puede permitir misiones de exploración de la superficie planetaria de bajo costo donde la masa y la potencia total disponible es extremadamente restringida.

Para llegar a la eficiencia de masa de carga útil relativamente alta, varias tareas como navegación y potencia se comparten entre el móvil y el módulo de aterrizaje a través de una conexión de amarre. Además, en lugar de un sistema de locomoción con ruedas, las orugas brindan una alta movilidad y una locomoción robusta entre rocas al tiempo que mantienen el diseño del chasis simple. El Nanokhod puede llevar a cabo investigaciones científicas en las proximidades de un módulo de aterrizaje científico estático en un radio de unos 50 m.¹³



Ilustración 5 Partes del nanokhod.

a) Configuración almacenada.

b) Cabina de carga útil desplegada (PLC) con esquema del campo de visión del instrumento.

Unidades de locomoción: Ambas unidades de locomoción consisten en dos paredes cada una, que sostienen la lámina de la pista alrededor de su circunferencia. Los yugos del motor conectan ambas paredes estructuralmente. La pista recorre dos engranajes de rueda dentada, de los cuales solo uno se acciona por unidad.¹⁴

¹³ Schiele, A., Romstedt, J., Lee, C., Henkel, H., Bertrand, R., Klinkner, S., . . . Michaelis, H. (10 de junio de 2008). Nanokhod Exploration Rover. IEEE, 15, 96-107. Obtenido de <https://ieeexplore-ieee.org.aure.unab.edu.co/document/4539727>

¹⁴ Schiele, A., Romstedt, J., Lee, C., Henkel, H., Bertrand, R., Klinkner, S., . . . Michaelis, H. (10 de junio de 2008). Nanokhod Exploration Rover. IEEE, 15, 96-107. Obtenido de <https://ieeexplore-ieee.org.aure.unab.edu.co/document/4539727>

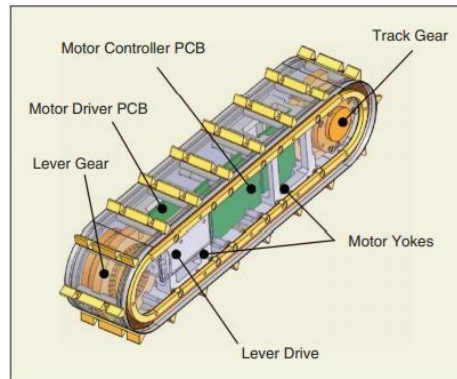


Ilustración 6 Partes oruga para nanokhod.

3.6. MÉTODO NEWTON-EULER

En esta sección se podrá evidenciar la información necesaria para entender el método usado para el modelamiento matemático, que se describe como un conjunto de ecuaciones para obtener posiciones, velocidades y aceleraciones, tanto lineales como angulares, además de, las fuerzas y los momentos de la planta.

3.6.1. SUMATORIA DE FUERZAS O FUERZA RESULTANTE

Considerando que trabajaremos con cuerpos rígidos, omitiremos todo el procedimiento para determinar la ecuación iniciando desde la aplicación de la segunda ley de Newton a cada partícula y dejando el resultado para todo el cuerpo, el cual es que la sumatoria de fuerzas externas aplicadas a los cuerpos será igual a la masa de todo el sistema multiplicado por la aceleración del centroide del sistema, como se puede ver a continuación:

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = m_S * \vec{a}_S^*$$

Ecuación 1 Fuerza resultante.¹⁵

Donde:

$\vec{F}_i \rightarrow$ Fuerzas externas aplicadas al cuerpo

¹⁵ Ginsberg, J. H. (1995). Advanced Engineering Dynamics. Cambridge: Cambridge University Press. Recuperado el 6 de agosto de 2019

$n \rightarrow$ Cantidad de fuerzas externas aplicadas al cuerpo

$m_s \rightarrow$ Masa del cuerpo S

$\vec{a}_s \rightarrow$ Aceleración del centroide del cuerpo S

3.6.2. SUMATORIA DE MOMENTOS O MOMENTO RESULTANTE

La siguiente es la forma general de la ecuación de Euler para el movimiento rotacional de un cuerpo rígido de nombre “S”, esta ecuación no tiene restricciones con respecto a la localización o movimiento del punto “O” el cual es con respecto al cual se está haciendo la sumatoria de momentos, la ecuación mencionada anteriormente es la siguiente:

$$\sum \vec{M}^i = \vec{r}_{OS^*} \times m_s * {}^N \vec{a}_s + [{}^{S/S^*} \cdot \vec{a}^s + {}^N \vec{\omega}^S \times ({}^{S/S^*} \cdot \vec{\omega}^s)]$$

Ecuación 2 Momento resultante.¹⁶

Donde los términos que aún no conocemos son:

$\sum \vec{M}^{S/O} \rightarrow$ Sumatoria de momentos en el cuerpo S con respecto al punto O

$\vec{r}_{OS^*} \rightarrow$ Vector posición del punto O al centroide del cuerpo S

$\vec{I}^{S/S^*} \rightarrow$ Matriz de inercia del cuerpo S medida desde el centroide del cuerpo

${}^N \vec{\alpha}^S \rightarrow$ Aceleración angular del cuerpo S en el sistema de referencia N

${}^N \vec{\omega}^S \rightarrow$ Velocidad angular del cuerpo S en el sistema de referencia N

3.6.3. RELACIÓN GENERAL DE VELOCIDAD Y ACELERACIÓN ENTRE 2 PUNTOS

Considerando dos partículas arbitrarias, la partícula “P” y la partícula “Q” las cuales se están moviendo en el espacio en relación con algún punto fijo el cual llamaremos “O”, dicha consideración se encuentra representada en la séptima ilustración, la cual se encuentra a continuación.

¹⁶ Ginsberg, J. H. (1995). Advanced Engineering Dynamics. Cambridge: Cambridge University Press. Recuperado el 6 de agosto de 2019

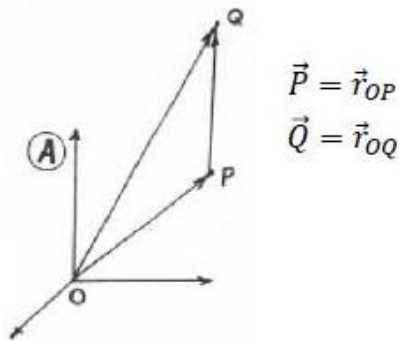


Ilustración 7 Dos partículas moviéndose en relación al punto "O".

En cuanto a la relación general de la velocidad entre estas dos partículas, se presenta la siguiente ecuación, la cual es válida para cualquier movimiento y/o caso, incluso cuando las partículas P y Q no pertenecen al sistema de referencia A o B los cuales son donde se desea hallar la velocidad y donde se encuentran esos puntos contenidos respectivamente.

$${}^A\vec{v}^Q = {}^A\vec{v}^P + {}^B\vec{v}^{Q/P} + {}^A\vec{\omega}^B \times \vec{r}_{PQ}$$

Ecuación 3 Relación de velocidad general.¹⁷

Donde:

${}^A\vec{v}^Q \rightarrow$ Velocidad del punto Q en el sistema de referencia A

${}^A\vec{v}^P \rightarrow$ Velocidad del punto P en el sistema de referencia A

${}^B\vec{v}^{Q/P} \rightarrow$ Velocidad del punto Q con respecto al punto P en el sistema B

$\vec{r}_{PQ} \rightarrow$ Vector posición del punto Q con respecto al punto P

Para la relación general de la velocidad entre dos partículas, es realizar la derivada de la ecuación anterior con respecto al tiempo, y al realizar las operaciones correspondientes obtenemos la siguiente ecuación, y de manera similar a la anterior ecuación no tiene ninguna restricción con respecto a los puntos.

$${}^A\vec{a}^Q = {}^A\vec{a}^P + {}^B\vec{a}^{Q/P} + {}^A\vec{a}^B \times \vec{r}_{PQ} + {}^A\vec{\omega}^B \times ({}^A\vec{\omega}^B \times \vec{r}_{PQ}) + 2 {}^A\vec{\omega}^B \times {}^B\vec{v}^{Q/P}$$

Ecuación 4 Relación de aceleración general.¹⁸

¹⁷ Ginsberg, J. H. (1995). Advanced Engineering Dynamics. Cambridge: Cambridge University Press. Recuperado el 6 de agosto de 2019

¹⁸ Ginsberg, J. H. (1995). Advanced Engineering Dynamics. Cambridge: Cambridge University Press. Recuperado el 6 de agosto de 2019

Donde los términos que aún no conocemos son:

${}^A\vec{a}^Q \rightarrow$ Aceleración del punto Q en el sistema de referencia A

${}^A\vec{a}^P \rightarrow$ Aceleración del punto P en el sistema de referencia A

${}^B\vec{a}^{Q/P} \rightarrow$ Aceleración del punto Q con respecto al punto P en el sistema B

3.6.4. TEOREMA DE SUMA DE VELOCIDADES ANGULARES

La manera fácil de obtener la velocidad angular de un cuerpo conociendo la velocidad angular de otro cuerpo es mediante el teorema de la suma de velocidades, el cual postula que para adquirir la velocidad angular de un cuerpo se pueden utilizar sistemas de referencias auxiliares, que, a pesar de no ser de interés, ayudan a calcular la velocidad angular de un cuerpo conectado a ellos, expresando lo anterior matemáticamente se obtiene que:

$${}^A\vec{\omega}^B = {}^A\vec{\omega}^{A1} + {}^{A1}\vec{\omega}^{A2} + \dots + {}^{An-1}\vec{\omega}^{An} \dots + {}^{An}\vec{\omega}^B$$

Ecuación 5 Suma de velocidades angulares.¹⁹

En la ecuación anterior se desea obtener la velocidad angular del cuerpo B desde el sistema de referencia A , pero para ello se pasa por “ n ” sistemas de referencias que para el cálculo no son necesarios, pero son convenientes y conocidos.

3.6.5. DERIVADA CINEMÁTICA

La derivada cinemática es un operador el cual facilita el trabajo de calcular derivada de vectores que se encuentran en un sistema de referencia diferente al que se desea obtener el resultado, es decir, se puede obtener la derivada en un sistema totalmente diferente al que se tiene el vector, dicho operador es el siguiente:

$${}^N\frac{d}{dt}(\quad) = {}^A\frac{d}{dt}(\quad) + {}^N\vec{\omega}^A \times (\quad)$$

Ecuación 6 Derivada cinemática.²⁰

¹⁹ Ginsberg, J. H. (1995). Advanced Engineering Dynamics. Cambridge: Cambridge University Press. Recuperado el 6 de agosto de 2019

²⁰ Ginsberg, J. H. (1995). Advanced Engineering Dynamics. Cambridge: Cambridge University Press. Recuperado el 6 de agosto de 2019

Donde:

${}^N \frac{d}{dt}$ → Derivada en el sistema que se desea obtener el vector.

${}^A \frac{d}{dt}$ → Derivada en el sistema donde se encuentra el vector a derivar.

${}^N \vec{\omega}^A$ → Velocidad angular del cuerpo que contiene el vector a derivar.

() → Espacio que se rellenará con el vector que se desea derivar.

3.6.6. ACELERACIONES ANGULARES

En el caso de las aceleraciones angulares no existe, como si ocurre en las velocidades angulares, un teorema que defina la obtención de este parámetro, por tal motivo es necesario el uso de la definición de la aceleración como la derivada de la velocidad, y en este caso utilizar el operador conocido como la derivada cinemática si el sistema donde se desea calcular la aceleración angular es diferente al sistema donde se tiene la velocidad angular, si el sistema es el mismo no existiría una velocidad angular entre los dos sistemas de referencia y la operación sería una derivada simple, por ese motivo la ecuación para obtener la aceleración angular de un cuerpo es la siguiente:

$${}^A \vec{\alpha}^B = {}^A \frac{d}{dt} ({}^X \vec{\omega}^B)$$

Ecuación 7 Aceleración angular.²¹

3.6.7. INTERACCIÓN LLANTA – SUELO

Debido a la deformación de la rueda, de la superficie o de ambas se presenta una dificultad mecánica para la rotación de las ruedas sobre superficies. Aunque está acompañada de fricción por tendencia al deslizamiento, su origen es por deformación. Esta deformación tiene un parámetro dimensional “a” de cuyo valor depende la resistencia o dificultad para la rodadura. El a su vez depende del radio y de las rigideces (terreno y rueda).

²¹ Ginsberg, J. H. (1995). Advanced Engineering Dynamics. Cambridge: Cambridge University Press. Recuperado el 6 de agosto de 2019

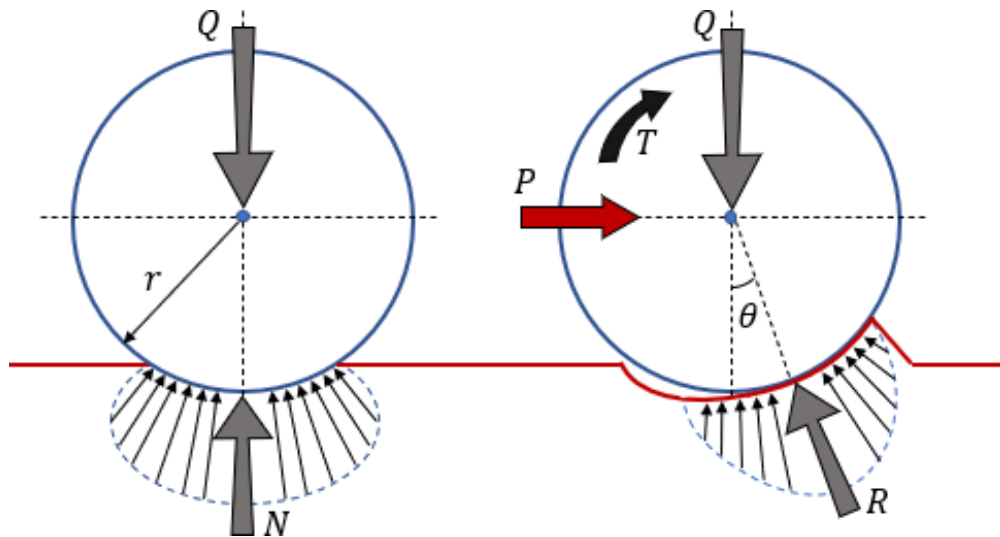


Ilustración 8 Fuerzas en la llanta en reposo y en movimiento inminente.

De la imagen anterior se puede decir que:

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{a}{r} \right)$$

Ecuación 8 Ángulo para la obtención del punto de contacto de la fuerza puntual.²²

Como se puede observar en la imagen anterior en el apartado de la derecha se observa una rueda sin movimiento inminente, en este caso, la presión ejercida por el suelo a la rueda es una carga distribuida variable, cuya equivalencia de carga concentrada es la fuerza "N".

Por otra parte, en la parte izquierda de la imagen se puede observar como esa carga distribuida reacciona al momento "T" aplicado en la rueda que está en movimiento inminente, nótese que la equivalente de la carga concentrada en este caso "R" no se encuentra vertical, sino que se encuentra inclinada un ángulo θ con respecto a la vertical.

Existen dos casos básicos los cuales son:

Caso I: Rueda en movimiento inminente tirada o empujada por una fuerza P que pasa por el centro de ella.

²² Muro, T., & O'Brien, J. (2004). TERRAMECHANICS Land Locomotions Mechanics. Tokyo: A. A. BALKEMA PUBLISHERS. Recuperado el 2 de diciembre de 2020

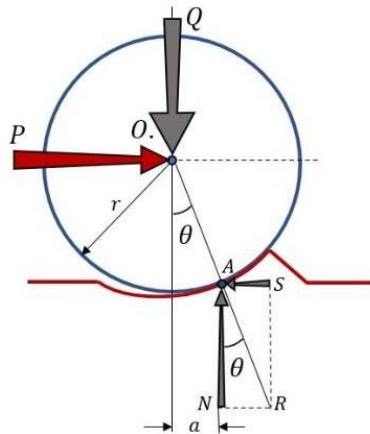


Ilustración 9 Llanta con movimiento inminente accionada por una fuerza.

Para que no exista deslizamiento la fuerza “S” debe ser menor o igual que el coeficiente de fricción estática por la fuerza “N”, después de realizar los cálculos de momentos iguales a cero, porque aún no hay movimiento, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\left\{ P = \frac{a}{r} * Q \right\} \text{ Cuando } \theta \leq 10^\circ \text{ porque } \cos(\theta) \cong 1$$

$$\left\{ P = \frac{a}{r * \cos(\theta)} * Q \right\} \text{ Cuando } \theta > 10^\circ$$

Ecuación 9 Fuerza necesaria para mover la rueda.²³

Caso II: Rueda en movimiento inminente accionada por un momento.

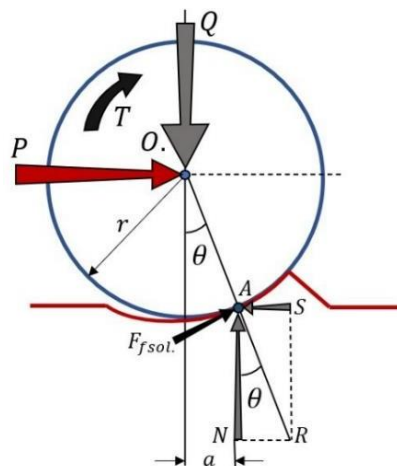


Ilustración 10 Llanta con movimiento inminente accionada por un momento.

²³ Muro, T., & O'Brien, J. (2004). TERRAMECHANICS Land Locomotions Mechanics. Tokyo: A. A. BALKEMA PUBLISHERS. Recuperado el 2 de diciembre de 2020

Para que no exista deslizamiento al momento del movimiento, la fuerza de fricción solicitada debe ser menor o igual al coeficiente de fricción estático por la fuerza “R”, donde la fuerza de fricción solicitada es igual al torque aplicado en la rueda sobre el radio de la rueda, eso cuando el movimiento es inminente, es decir, que el par es suficiente para el movimiento, luego de realizar los cálculos se obtiene que:

$$T = a * Q \rightarrow \text{Para cualquier valor de } \theta$$

Ecuación 10 Torque necesario para mover la rueda.²⁴

$$\left\{ \begin{array}{l} S = F_{f\text{solicitada}} \\ Q = N \end{array} \right\} \text{ Cuando } \theta \leq 10^\circ \text{ \{Superficies rigidas\}}$$

$$S = F_{f\text{solicitada}} * \cos(\theta) \quad \text{Rueda rigida y suelo deformable}$$

$$\left\{ Q = N + F_{f\text{solicitada}} * \sin(\theta) \right\} \text{ Cuando } \theta > 10^\circ \left\{ \begin{array}{l} \text{Rueda y suelo deformable} \\ \text{Rueda deformable y suelo rigido} \end{array} \right\}$$

Ecuación 11 Fuerzas reactivas en rotación inminente.²⁵

A pesar de que son dos casos diferentes existe una equivalencia entre ellos, debido a que un torque no es más que una fuerza aplicada a una distancia de un punto, por tal motivo tenemos que al multiplicar el caso I por el radio de la rueda (r) para $\theta \leq 10^\circ$ obtenemos la siguiente ecuación:

$$P * r = \frac{a}{r} * Q * r = a * Q = T$$

Ecuación 12 Equivalencia entre casos cuando θ es menor igual que 10° .²⁶

De manera similar al multiplicar el caso II por la distancia que existe en vertical del centro de la rueda al punto de contacto, lo cual se representa matemáticamente como $r * \cos(\theta)$, para $\theta > 10^\circ$ tenemos que:

$$P * r * \cos(\theta) = \frac{a}{r * \cos(\theta)} * Q * r * \cos(\theta) = a * Q = T$$

Ecuación 13 Equivalencia entre casos cuando θ es mayor que 10° .²⁷

²⁴ Muro, T., & O'Brien, J. (2004). TERRAMECHANICS Land Locomotions Mechanics. Tokyo: A. A. BALKEMA PUBLISHERS. Recuperado el 2 de diciembre de 2020

²⁵ Muro, T., & O'Brien, J. (2004). TERRAMECHANICS Land Locomotions Mechanics. Tokyo: A. A. BALKEMA PUBLISHERS. Recuperado el 2 de diciembre de 2020

²⁶ Muro, T., & O'Brien, J. (2004). TERRAMECHANICS Land Locomotions Mechanics. Tokyo: A. A. BALKEMA PUBLISHERS. Recuperado el 2 de diciembre de 2020

²⁷ Muro, T., & O'Brien, J. (2004). TERRAMECHANICS Land Locomotions Mechanics. Tokyo: A. A. BALKEMA PUBLISHERS. Recuperado el 2 de diciembre de 2020

3.7. MICROCONTROLADORES

Los microcontroladores son circuito constituido por millares de transistores integrados en un chip, que realiza alguna determinada función de las computadoras electrónicas digitales.²⁸

3.7.1. RASPBERRY PI

Es un ordenador de tamaño de tarjeta de crédito que se conecta a su televisor y un teclado». Es una placa que soporta varios componentes necesarios en un ordenador común. Es un pequeño ordenador capaz, que puede ser utilizado por muchas de las cosas que su PC de escritorio hace, como hojas de cálculo, procesadores de texto y juegos. También reproduce vídeo de alta definición.²⁹



Ilustración 11 Placa raspberry pi Fuente: Raspberry pi.

3.7.2. ARDUINO

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software fácil de usar. Las placas Arduino pueden leer entradas (luz en un sensor, un dedo en un botón o un mensaje de Twitter) y convertirlo en una salida: activar un motor, encender un LED, publicar algo en línea. Puede decirle a su placa qué hacer enviando un conjunto de instrucciones al microcontrolador de la placa. Para hacerlo,

²⁸ Real Academia Española. (s.f.). Diccionario de la Real Academia Española. Recuperado el 7 de agosto de 2019, de <https://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=microprocesador>

²⁹ ABC. (21 de julio de 2013). ABC. Recuperado el 5 de agosto de 2019, de <https://www.abc.es/tecnologia/informatica-hardware/20130716/abci-raspberry-como-201307151936.html>

utiliza el lenguaje de programación Arduino (basado en el cableado) y el software Arduino (IDE), basado en el procesamiento.³⁰



Ilustración 12 Placa arduino mega Fuente: Arduino.

3.8. APP INVENTOR

Entorno de programación visual e intuitivo que permite a todos, incluso a los niños, crear aplicaciones totalmente funcionales para teléfonos inteligentes y tabletas; buscando democratizar el desarrollo de software al empoderar a todas las personas, especialmente a los jóvenes, para pasar del consumo de tecnología a la creación de tecnología.³¹



Ilustración 13 Logotipo app inventor Fuente: App inventor.

3.9. BLUETOOTH

Es una especificación tecnológica para redes inalámbricas que permite la transmisión de voz y datos entre distintos dispositivos mediante una radiofrecuencia segura (2,4 GHz). Esta tecnología, por lo tanto, permite las comunicaciones sin cables ni conectores y la posibilidad de crear redes inalámbricas domésticas para

³⁰ ARDUINO. (s.f.). ARDUINO. Recuperado el 3 de agosto de 2019, de <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>

³¹ Massachusetts Institute of Technology. (s.f.). AppInventor. Recuperado el 2 de septiembre de 2019, de <https://appinventor.mit.edu/about-us>

sincronizar y compartir la información que se encuentra almacenada en diversos equipos.

El término Bluetooth (“Diente azul” en inglés, aunque el nombre proviene del rey danés y noruego Harald Blåtand, traducido como Harold Bluetooth) es la denominación comercial y popular del estándar de comunicación inalámbrica IEEE 802.15.1. La primera empresa en investigar esta tecnología fue Ericsson, encargada de liderar un grupo que, con el tiempo, sumó a IBM, Nokia, Microsoft, Motorola y otras compañías que apoyaron el estándar.

Las computadoras, los teléfonos móviles y las cámaras digitales son algunos de los dispositivos que pueden comunicarse mediante la tecnología Bluetooth (siempre que sus modelos se lo permitan).

Existen tres clases de Bluetooth:

- Clase 1 (con un alcance aproximado de 100 metros)
- Clase 2 (10 metros)
- Clase 3 (1 metro)

Los especialistas consideran que, en los próximos años, todos los equipos tecnológicos tendrán la capacidad de comunicarse entre sí gracias al estándar.³²

3.10. ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS (FEA)

Consiste en el modelado de productos y sistemas en un entorno virtual, con el objetivo de encontrar y resolver posibles problemas estructurales o de rendimiento (o problemas ya existentes). El FEA es la aplicación práctica del método de elementos finitos (FEM), que utilizan los ingenieros y científicos para modelar matemáticamente y resolver numéricamente complejos problemas estructurales, de fluidos y multifísica. El software de FEA se puede utilizar en una amplia gama de sectores, pero habitualmente se emplea en el sector de la aeronáutica, la biomecánica y la automoción.

Un modelo de elementos finitos (FE) consta de un sistema de puntos, denominados "nodos", que dibujan la forma del diseño. Conectados a estos nodos se encuentran los propios elementos finitos, que conforman la malla de elementos finitos y que contienen las propiedades estructurales y de material del modelo que definen cómo responderá este ante determinadas condiciones. La densidad de la malla de elementos finitos puede variar a lo largo del material, en función del cambio anticipado en los niveles de tensión de un área determinada. Las regiones que experimentan cambios importantes en la tensión suelen requerir una densidad de

³² Definición. (s.f.). Recuperado el 3 de septiembre de 2019, de <https://definicion.de/bluetooth/>

mallas más elevadas que aquellas que experimentan pocas variaciones en la tensión o incluso ninguna. Entre los puntos de interés se encuentran los puntos de fractura de un material probado previamente, las curvas, las esquinas, los detalles complejos y las áreas de tensión elevada.³³

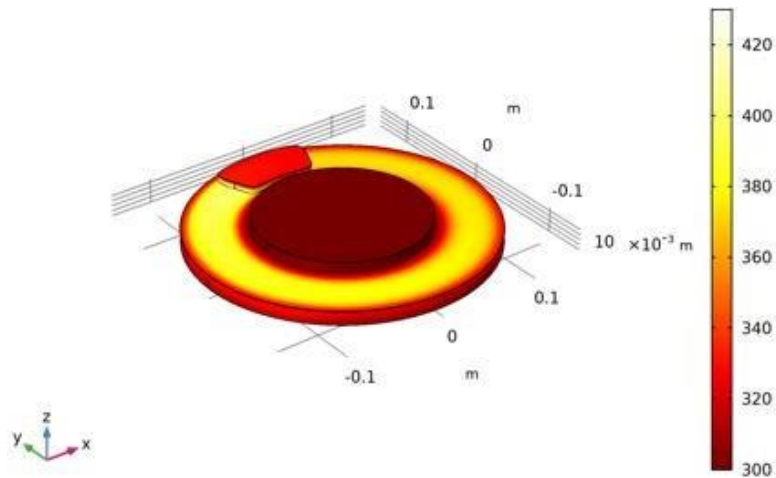


Ilustración 14 Análisis elementos finitos Fuente: Siemens.

³³ SIEMENS. (s.f.). SIEMENS. Recuperado el 3 de septiembre de 2019, de <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/finite-element-analysis-fea/13173>

4. DESARROLLO

En el presente apartado de este documento se mostrará todo el trabajo realizado por parte del equipo de trabajo, desde la toma de datos en el cultivo, caracterización del terreno, como diseño del circuito (eléctrico y electrónico) y mecánico (planteamiento del prototipo, elementos de máquina a utilizar en el mismo, modelado 3D del vehículo, análisis de selección de materiales, entre otros), programación (tanto de microcontrolador para accionamiento como aplicación para el control) para el planteamiento de la solución que cumpla todos los objetivos definidos anteriormente.

4.1. MEDIDAS DEL CULTIVO

Inicialmente se tomaron medidas de las semillas de cebolla larga que se encontraban listas para ser plantadas en un cultivo del corregimiento de Berlín, Santander, de dichas mediciones se obtuvo la información que se muestra consignada en la siguiente tabla.

Tabla 2 Altura de semillas a sembrar.

SEMILLA	MEDIDAS (cm)	SEMILLA	MEDIDAS (cm)	SEMILLA	MEDIDAS (cm)
1	34,5	22	30,6	43	31,2
2	37,2	23	30,5	44	29,8
3	33,7	24	34,8	45	32,4
4	29,6	25	33,8	46	33,7
5	35,1	26	29,7	47	35,3
6	33,3	27	36,3	48	36,6
7	31,8	28	31	49	32,8
8	38,4	29	28,8	50	36
9	32,5	30	36	51	33
10	34,5	31	33	52	32,1
11	36,1	32	29,5	53	36,4
12	35,8	33	35,2	54	33,9
13	35,3	34	32	55	34
14	31,9	35	31,8	56	35,3
15	36,4	36	32	57	35,7
16	35,2	37	39,1	58	36
17	35,5	38	33	59	37,6
18	33,6	39	35	60	35,8
19	35,7	40	37	PROMEDIO	33,8
20	30,2	41	31,2	MÍNIMO	28,8
21	31,4	42	32,4	MÁXIMO	39,1

Con los datos anteriormente obtenidos de las 60 semillas de cebolla larga medidas se procedió a calcular el valor máximo, mínimo y el promedio obtenido durante la toma de datos, dichos datos fueron necesario para realizar los bosquejos para el diseño del vehículo tipo rover, finalmente se graficaron dichos valores, como se muestra en la siguiente imagen.

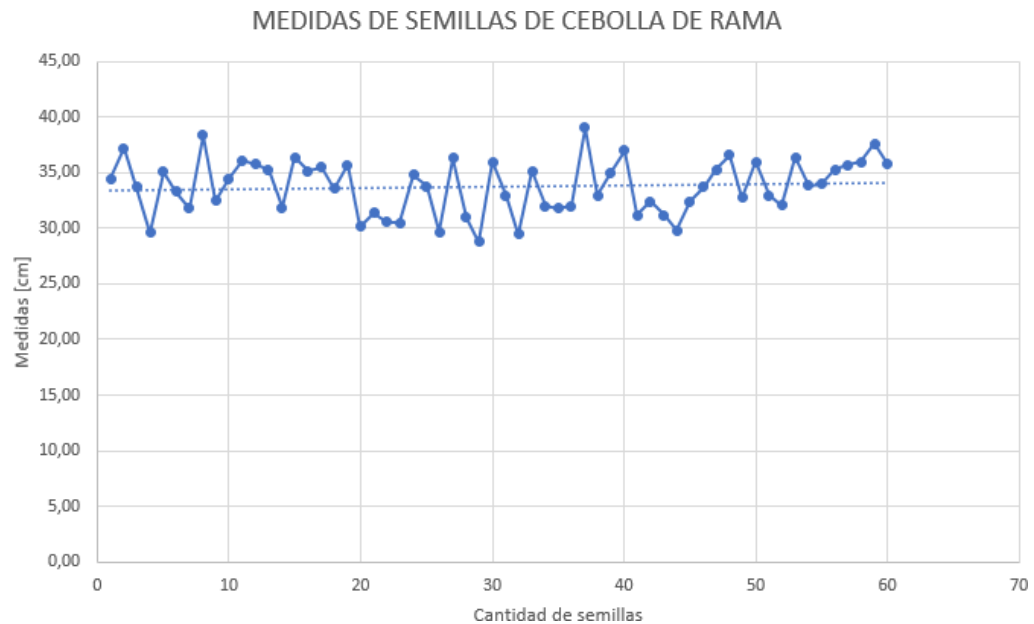


Ilustración 15 Medida de semillas de cebolla de rama.

En la gráfica anterior se puede evidenciar que las medidas de las semillas están agrupadas en el sector comprendido entre 37 y 32 centímetros de largo, estos datos serán utilizados posteriormente para el diseño del vehículo tipo rover.

Posteriormente, realizó la medida de la altura de las plantas de cebolla que están próximas a ser retiradas del cultivo, debido a que es la altura máxima a la cual pasara el vehículo, estas medidas fueron tomadas desde el suelo hasta la parte más alta de la planta sembrada. Dichas medidas tienen incluidas la altura del surco la cual es aproximadamente 20 centímetros.

Tabla 3 Alturas de planta con surco.

PLANTA	MEDIDAS (cm)	PLANTA	MEDIDAS (cm)	PLANTA	MEDIDAS (cm)
1	60,1	22	60,2	43	65,6
2	65,3	23	61,7	44	63,4
3	58,4	24	61,2	45	64,8
4	63,3	25	59,6	46	59,1
5	67,7	26	60,7	47	58,3
6	60,5	27	58,4	48	67,2
7	61,6	28	64,3	49	63,7
8	58,7	29	66,1	50	64,5
9	60,4	30	62,3	51	66,1
10	62,3	31	58,3	52	62,9
11	62,7	32	60,1	53	60,9
12	65,4	33	63,6	54	62,4
13	58,3	34	64,2	55	59,6
14	58,5	35	60,1	56	60,8
15	60,8	36	60,4	57	64,5
16	67,1	37	63,6	58	66,8
17	65,3	38	59,5	59	62,4
18	64,1	39	64,1	60	58,1
19	60,4	40	65,6	PROMEDIO	62,27
20	64,3	41	60,3	MÍNIMO	58,1
21	63,8	42	61,7	MÁXIMO	67,7

Posteriormente con los valores obtenidos se procedió a continuar con la realización de bosquejos y se graficaron los valores, como se muestra en la siguiente imagen.

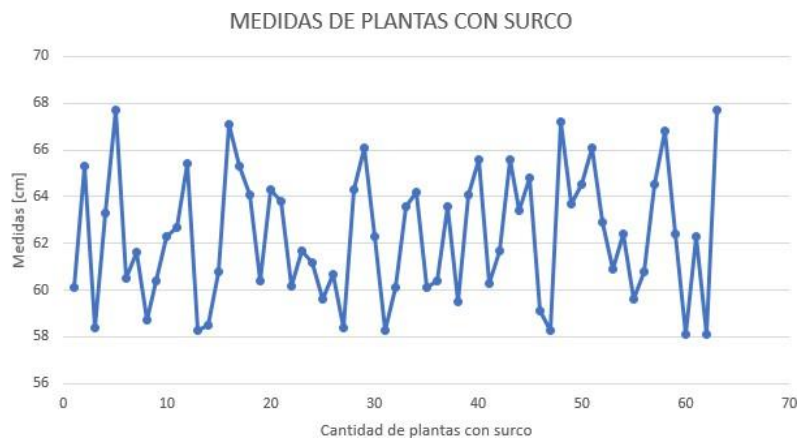


Ilustración 16 Altura de plantas con surco.

Durante el procedimiento de toma de datos en Berlín, Santander, encontramos que los cultivadores de cebolla larga tienen 2 tipos de organización en sus cultivos, el primero de ellos es para lugares donde el terreno está prácticamente a nivel, para este tipo de terrenos realizan la siembra en rectángulos que tienen por un lado 30 centímetros entre cada planta y por el otro 40 centímetros entre cada surco, hendidura que se hace en la tierra con el arado³⁴, con el fin de dar el espacio necesario para realizar labores en el cultivo posteriores a la siembra de la cebolla.

En la siguiente imagen se muestra un cultivo de cebolla en un terreno prácticamente a nivel donde se observa una rejilla de color rojo la cual muestra la división entre los surcos de manera horizontal.



Ilustración 17 Cultivo organizado en rectángulos.

El segundo tipo de organización del cultivo de cebolla es en rombos, los cuales se utilizan cuando el suelo tiene un desnivel bastante notable, el cambio entre el tipo 1 y el tipo 2 se realiza para evitar que al momento de la época de invierno el agua se quede entre los surcos y generen la pérdida del cultivo de cebolla.

En la imagen que se muestra a continuación se puede evidenciar la organización del cultivo en los rombos mencionados anteriormente, además, se puede apreciar el desnivel del terreno.

³⁴ Real Academia Española. (octubre de 2014). Diccionario de la Lengua Española. Recuperado el 12 de marzo de 2020, de <https://dle.rae.es/surco>



Ilustración 18 Cultivo organizado en rombos.

4.2. BOSQUEJOS

De entre los vehículos tipo rover, no se pudo seleccionar los modelos de solero y nanokhod puesto que cada uno tenía un problema en particular. En el caso del solero, este tenía una llanta en la mitad del vehículo que le impediría moverse libremente sobre un terreno con un cultivo de cebolla, además de dañarlas al momento de desplazarse de un lugar a otro. En el caso del nanokhod, al ser tipo oruga, este no contaba con la altura suficiente para moverse en el mismo terreno ni dañar el cultivo. Por estas razones, fue seleccionado el sistema de rocker bogie, que además de contar con grandes cualidades al momento de desplazarse, se podían adecuar sus medidas para que fuera apto para el cultivo.

A continuación, se evidenciarán los primeros bosquejos planteados, en base a las medidas tomadas y a las precauciones que se tuvieron en cuenta para que, al momento de interactuar con el cultivo, el vehículo no generará colisiones con parte del cultivo y de esta manera no se conservara la calidad e integridad del producto, dichos bosquejos son representaciones en dos dimensiones del sistema a construir.

4.2.1. PRIMER BOSQUEJO

4.2.3. TERCER BOSQUEJO

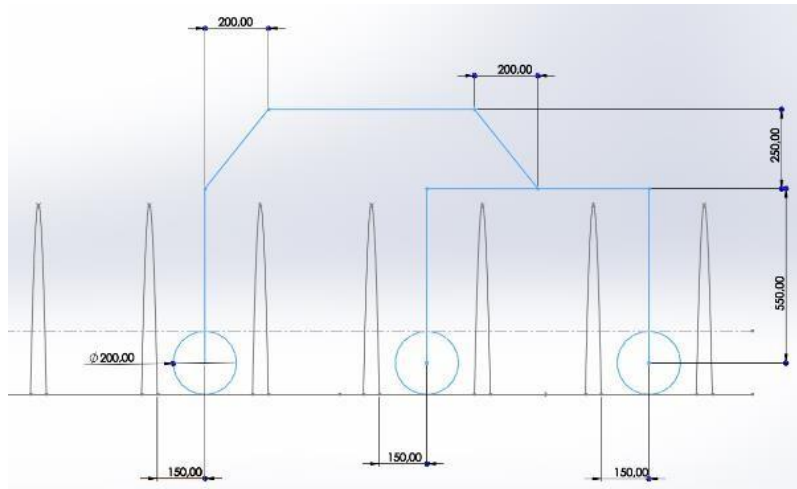


Ilustración 21 Tercer Bosquejo Rocker Bogie.

Se ajustaron las medidas del segundo bosquejo realizando la combinación entre el primer bosquejo y el segundo, resultando un vehículo con una buena relación entre la longitud de largo y alto del vehículo y no siendo un vehículo tan voluminoso como lo es el segundo bosquejo realizado.

Tomando en cuenta que el tamaño de este sistema sigue siendo bastante grande debido a que la altura de la cebolla es considerable, se realizó un escalado de este prototipo a la mitad para la reducción de costos del proyecto, el cual se muestra a continuación.

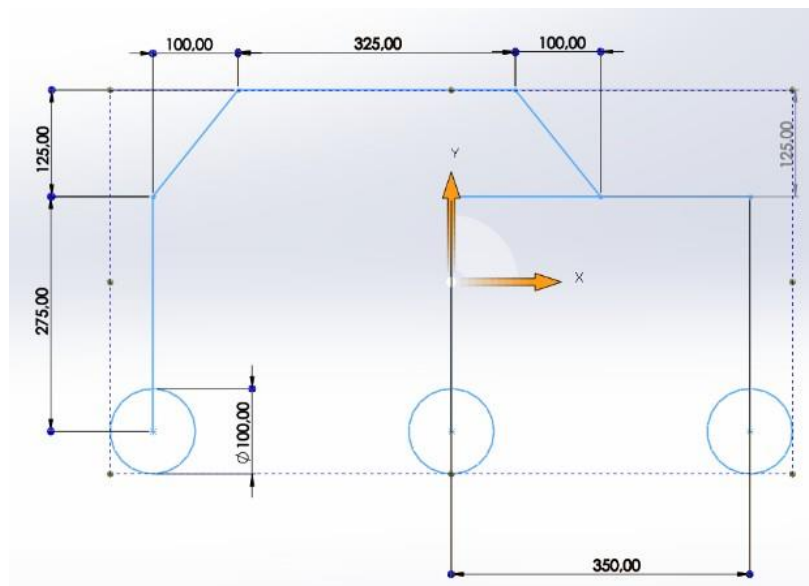


Ilustración 22 Bosquejo 3 escalado 0.5.

4.3. ELEMENTOS DE MÁQUINA

En los bosquejos mostrados anteriormente se puede ver todo el mecanismo como una sola entidad, pero para que el diseño funcione de manera correcta debe tener diferentes puntos de unión tanto en el mecanismo como en las piezas que modifican al mecanismo para adaptarse a lo que se necesita en el terreno. Dichos puntos de unión se detallarán a continuación.

4.3.1. UNIÓN ROCKER - BOGIE Y UNIÓN ENTRE LOS MECANISMOS

Para la unión entre el “Rocker” y el “Bogie” se tiene un par de chumaceras de parche de referencia FKL08 la cual soporta la carga radial al eje (lo cual hace que soporte parte del peso del mecanismo y el de la carga), dicha unión es seleccionada debido a su alta resistencia a cargas de tipo radial debido a que tiene un rodamiento de bolas en su interior el cual puede soportar cargas hasta 3.25 KN de carga dinámica y 1.37 KN de carga estática³⁵, además, su bajo rozamiento permite que el mecanismo se adapte al terreno.

Se utilizan dos chumaceras de parche debido a que este tipo de chumaceras permite el giro del rodamiento para adaptarse de tal manera que si por problemas de alineación del eje, el rodamiento gire de tal forma que aun permita el acople del eje, siendo dos chumaceras este giro está restringido y ambas chumaceras limitan el giro del rodamiento mutuamente.

³⁵ MBA EUROGROUP. (s.f.). Rodamiento Bulnes. Recuperado el 10 de septiembre de 2019, de <http://www.rodamientosbulnes.com/resources/catalogs/mba/bulnes-mba-rodamientos.pdf>



Ilustración 23 Unión Rocker – Bogie.

4.3.2. UNIÓN BOGIE – C'S Y ROCKER – C'S

En la unión entre el rocker se necesitaba un sistema el cual pudiera soportar la carga que ejercería el suelo sobre toda las C's que a su vez las transmite al mecanismo, esta carga es tanto radial como axial al eje superior de la pieza C debido a que el rocker no siempre se encontrará paralelo al terreno (ya que el terreno es irregular) por tal motivo se escogieron unos rodamientos cónicos, los cuales son capaces de soportar 29.7 KN de carga dinámica y 27KN de carga estática. La carga a soportar por estos rodamientos aproximadamente sería un sexto del peso de la carga y el peso del mecanismo.

Este sistema está asegurado con un anillo de seguridad en la parte superior y en la parte inferior tiene un tope mecánico con el eje.

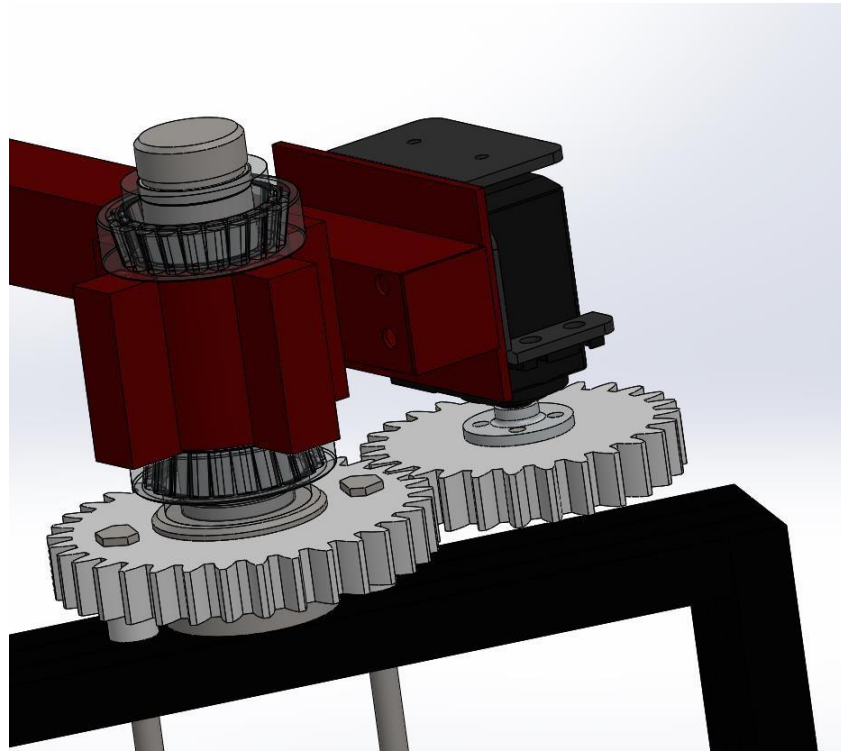


Ilustración 24 Detalle Mecanismo Unión Bogie – C.

4.3.3. TRANSMISIÓN DE DIRECCIÓN

Para la transmisión de potencia del servo a la pieza C se utiliza un par de engranajes los cuales dan una relación 1:1.22 con lo cual conseguimos transmitir los 11 Kg*cm, que es el torque de los servomotores, y aumentar este valor a 13.4 Kg*cm en las C's, de esta manera el servomotor no está sufriendo carga axial porque de esto se encarga el sistema anterior, solo está transmitiendo el ángulo de giro indicado por el usuario.

En la junta entre el servomotor y el engranaje se tiene como acople un disco metálico estándar el cual va atornillado al servomotor por el centro del disco con un tornillo milimétrico y tiene cuatro perforaciones más por donde se aprietan al engranaje, el engranaje cuenta con 8 perforaciones, 4 de estas diseñadas para el acople de un disco de 23 mm de diámetro y las otras 4 para el disco de 20 mm.

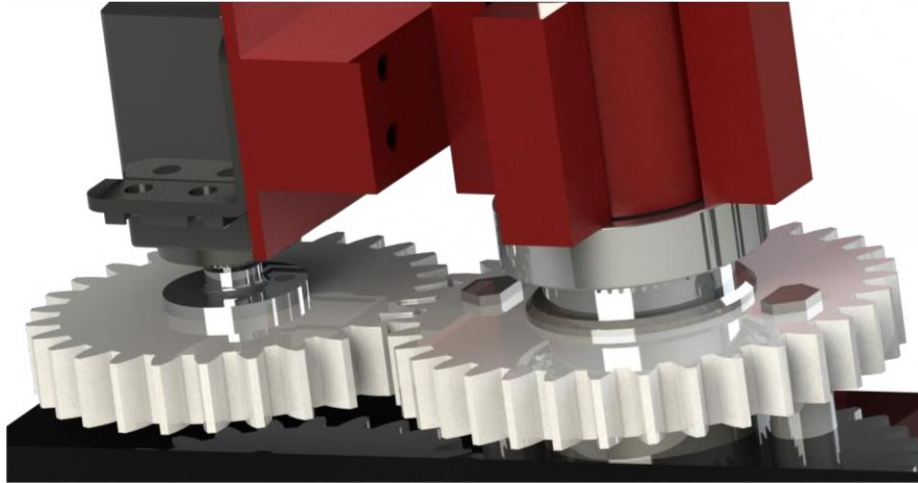


Ilustración 25 Engranajes para dirección.

4.3.4. ANCLAJE LLANTA CON C

El siguiente anclaje es el de la llanta a un costado de la “C”, este es el encargado de sujetar la llanta mediante un rodamiento de bolas para permitir la rotación con la menor fricción posible y de esta manera la llanta pivote en el eje fijo que pasa a través del rodamiento que está fijo en la pieza “C”.



Ilustración 26 Unión Llanta – C.

4.3.5. ANCLAJE DE MOTORREDUCTOR

Otra de las juntas es la del motorreductor que va en la parte inferior de las “C’s”, este acople es directo a la rueda, y el acople entre el motorreductor y las “C’s” se hace con unas “U” metálicas que tienen unas perforaciones que quedan alineadas con las que tiene el motorreductor para asegurar dicha pieza con el motorreductor y para estar sujeto a la “C” la “U” tiene una perforación en la parte final para atornillar a la “C”, como se muestra en la siguiente imagen.

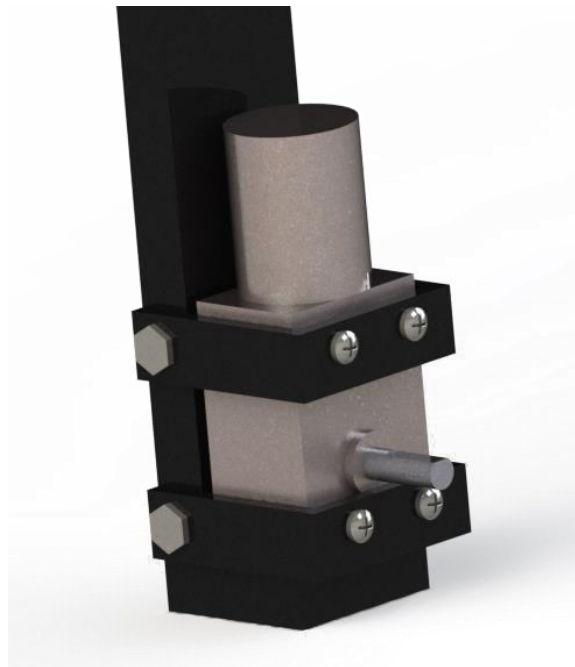


Ilustración 27 Fijación Motorreductor.

4.4. DISEÑOS CAD

Se inició con la parte del modelado 3D del mecanismo diseñado que se empleó para el recorrido del cultivo en la herramienta de Dassault Systèmes SE en la filial de SolidWorks Corp. SOLIDWORKS®, pasando las medidas anteriormente mostradas como se da a conocer a continuación.

En esta sección se verá lo que es el mecanismo en general, es decir, el diseño del vehículo. Además de mostrar los diseños de los demás componentes para transitar a los 3 modos de funcionamiento que este posee.

4.4.1. MECANISMO



Ilustración 28 Mecanismo Rocker Bogie vista isométrica

En la imagen anterior se muestra la vista isométrica del ensamble del mecanismo, donde se puede observar el rocker y el bogie, ambos de color rojo, también se muestra la pieza C, la cual es la encargada de darle la altura necesaria al mecanismo para que la cebolla larga pase por la parte inferior del vehículo, además se muestran las llantas y el motor encargado de accionar las mismas para que el vehículo realice el avance y retroceso, y finalmente se muestran los servomotores que dotados con un mecanismo de engranajes permiten el cambio del ángulo al que se encuentran las C's y de esta manera mover el vehículo en todas las direcciones.



Ilustración 29 Mecanismo Rocker Bogie vista lateral.

En la imagen anterior se muestra la vista lateral con el sistema configurado de manera diferente para la parte derecha e izquierda, además el ángulo de las llantas con respecto a la vertical es diferente para cada una de ellas.

A continuación, se muestra las juntas del mecanismo, la primera de ellas es la junta entre las “C’s” y el “Rocker” o el “Bogie”, la segunda es entre el servomotor para ajustar el ángulo con respecto a la vertical que tenga la “C” y el tercero y último de ellos es la junta entre el “Rocker” y el “Bogie”.

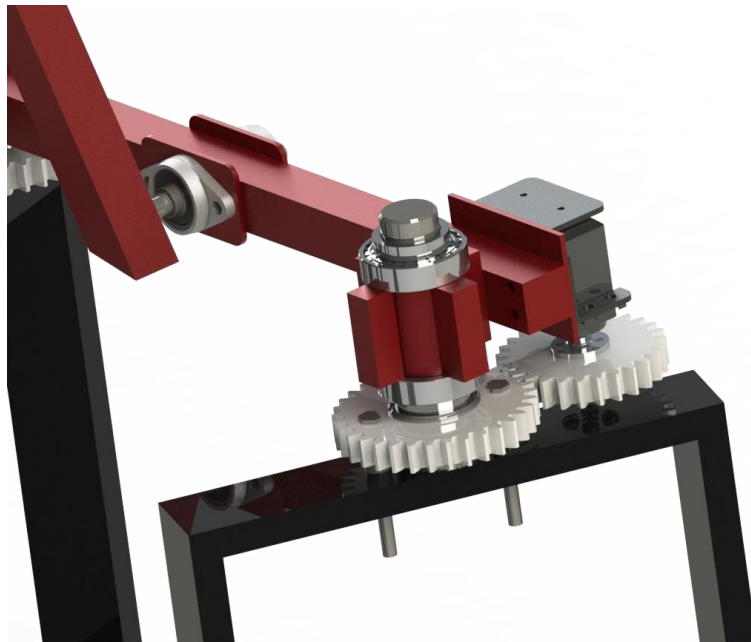


Ilustración 30 Mecanismo Unión Bogie – C.

Para el cumplimiento de cada una de las funciones propuestas a desarrollar por el vehículo se diseñó una placa la cual cambiará según la función a realizar, adicional a lo anterior se necesitó dónde ubicar los componentes electrónicos como lo son, el microcontrolador, los drivers, el sensor y las baterías, por tal motivo se agregó un cajón en la parte frontal con una rejilla en la parte inferior por donde se refrigerará el sistema, también cuenta con una tapa frontal transparente, la cual permitirá verificar el estado de conexión del vehículo con la aplicación, además del estado de funcionamiento de los ventiladores y drivers instalados en su interior sin necesidad de ser manipulados por el operador del vehículo.

La pieza anteriormente descrita se muestra a continuación en su estado inicial, es decir sin ninguno de los complementos necesarios para iniciar cualquiera de las labores que podría realizar el vehículo.

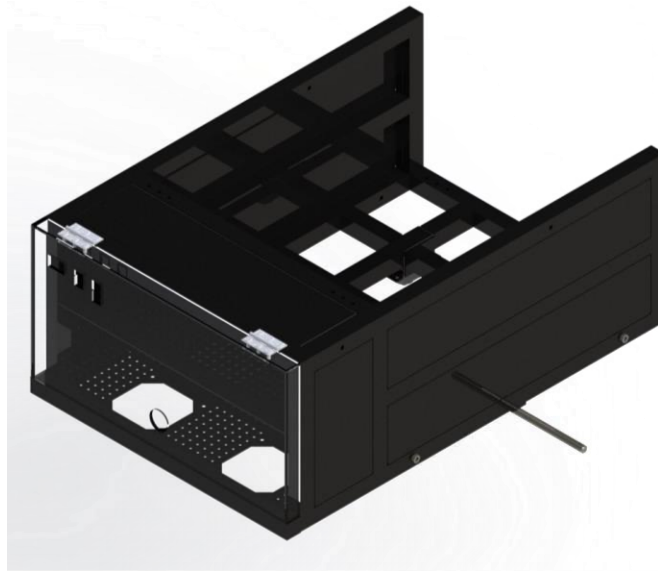


Ilustración 31 Placa en estado inicial.

4.4.2. TRANSPORTE

La placa en el modo transporte cumple la función de almacenar la carga que se desee transportar, los costados de la placa funcionan como limitadores de espacio para la carga y con esto asegura la integridad de la misma, la placa cuenta con una lámina la cual se encarga de hacer el sellado de los orificios encontrados en la parte inferior de la placa (orificios que más adelante se explicará su función).

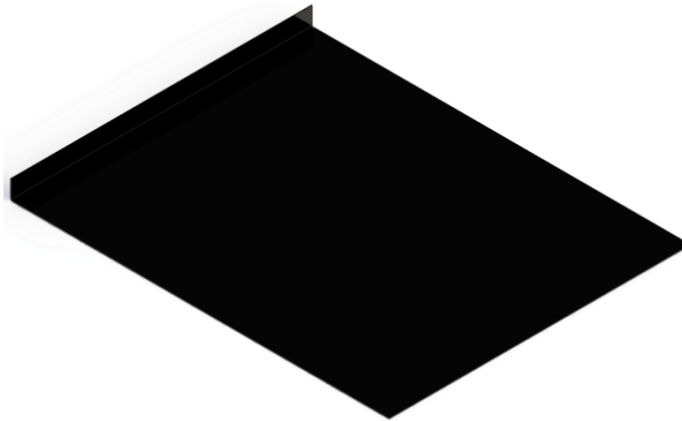


Ilustración 32 Lámina transporte

En la siguiente imagen se puede observar el ensamble de la placa con la respectiva lámina para la función de transporte y en la ilustración 31 se muestra el ensamble del mecanismo mostrado anteriormente con la placa en el modo transporte.

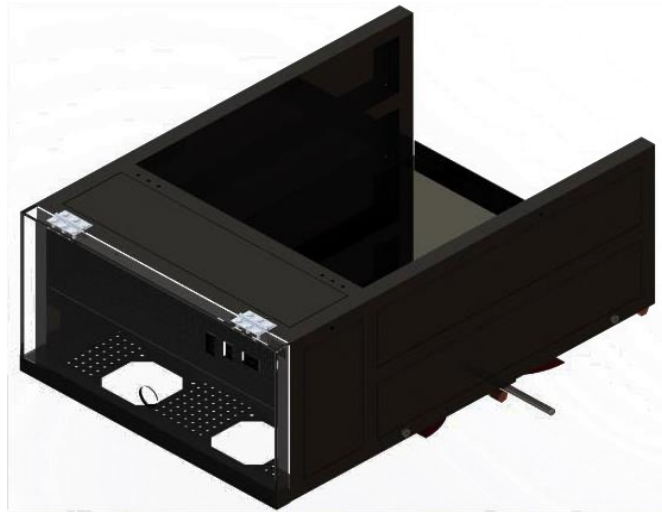


Ilustración 33 Placa en modo transporte.

La lamina mostrada anteriormente, iría ubicada dentro de la placa como se muestra en la figura anterior y que da lugar a placa en modo transporte. De ahí que ya la placa esta lista para transportar lo que el usuario necesite. Finalmente, el vehículo en general con el sistema rocker bogie se ve en modo transporte de la siguiente manera.



Ilustración 34 Vehículo en modo transporte.

4.4.3. RIEGO

Tomando como base la placa diseñada para el transporte se le realizaron unos ajustes, para cumplir con la etapa de riego, ajustes que incluyen una base para ubicar un servo válvula encargada de permitir o no el paso del líquido a aplicar en el cultivo, en la parte donde se ubica la carga, se apoya un tanque con el líquido (previamente alistado para realizar la aplicación) a aplicar, como se muestra en las siguientes imágenes.

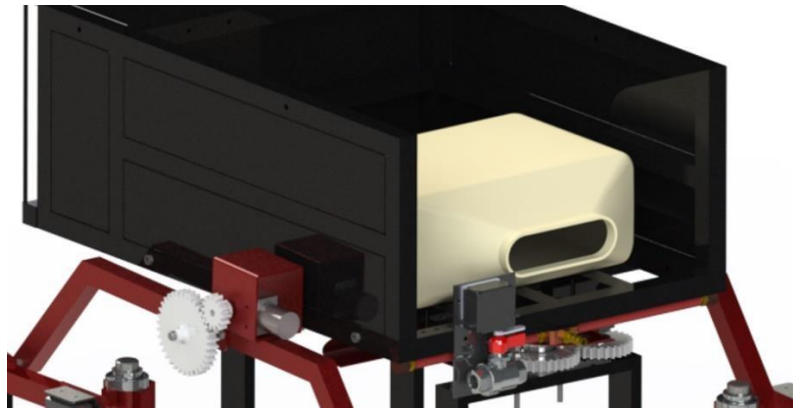


Ilustración 35 Placa riego.

El servo y la válvula están conectadas a una placa, que a su vez esta atornillada a la parte trasera de la placa y que mediante mangueras se interconectan para darle forma a todo el sistema; la válvula es operada mediante un servomotor que tiene un brazo atornillado a la cabeza de la válvula, permitiendo que esta pueda abrirse y cerrarse con el movimiento del servomotor, como se muestra a continuación.



Ilustración 36 Servomotor y válvula.



Ilustración 37 Cabeza de la válvula y brazo del servomotor.

Las piezas anteriormente mostradas están conectadas mediante un tornillo M3 en los orificios al final de cada pieza, que finalmente permiten la transmisión del torque del servomotor para el control de flujo de salida mediante la válvula.

Finalmente, en la siguiente imagen se muestra la parte inferior de la placa con las mangueras las cuales están perforadas para la salida del agua, se puede observar un espigo saliendo de la parte posterior de la placa, en ese lugar se conecta la manguera que viene de la válvula de bola.

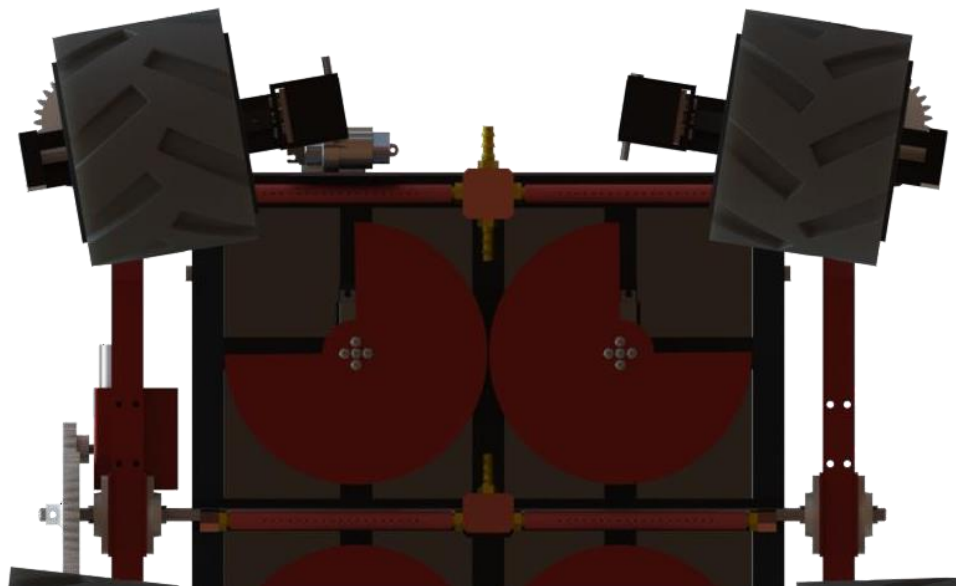


Ilustración 38 Manguera para riego.

4.4.4. SIEMBRA

Para la última labor del Rocker-Bogie, se utilizó la misma placa utilizada en las dos funciones anteriores, agregándole unas perforaciones en la parte inferior de donde se sujetarán los servomotores que serán implementados para sembrar la semilla. Adicionalmente se necesita ubicar la semilla en una posición conocida para depositar la semilla, por lo cual se diseñó una tolva para guiar la semilla al hueco destinado para ella. La tolva está sujeta a la base por unas perforaciones que tiene la base a los lados por donde se asegura con un tornillo y las semillas serán ubicadas en la parte donde se colocaba la carga en la función de transporte. En las siguientes imágenes se mostrarán las configuraciones para la función de siembra.

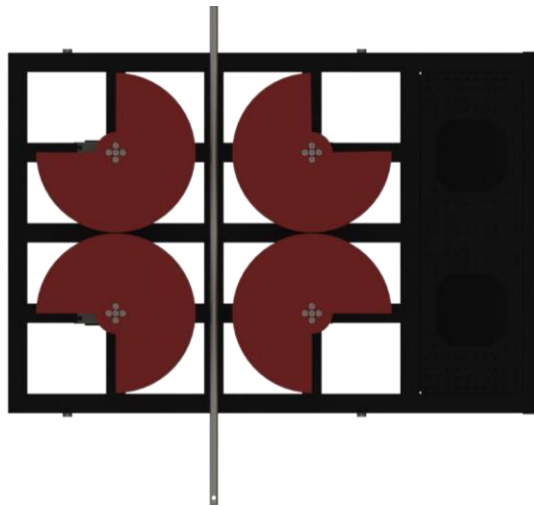


Ilustración 39 Placa de siembra.

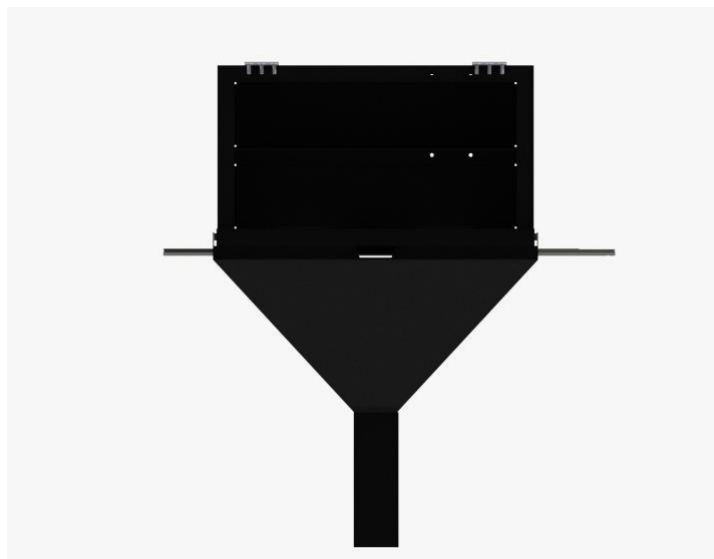


Ilustración 40 Placa con Tolva.

4.5. MODELO MATEMÁTICO

En este apartado se encontrarán los cálculos de la cinemática y la cinética del vehículo tipo rover, los cuales servirán para predecir el comportamiento del vehículo ante un determinado obstáculo y, que esfuerzos tendrá en ese momento y con esta información verificar los calibre o espesores seleccionados previamente en el diseño 3D.

4.5.1. CINEMÁTICA

En esta sección se evidenciarán los cálculos cinemáticos realizados del vehículo tipo rover, es decir, como se comporta cada una de las piezas o puntos de interés en el mecanismo cuando existe movimiento de todo el vehículo. En este primer análisis no se tienen en cuenta que fuerzas actúan sobre el rover.

4.5.1.1. NOMBRE DE LOS CUERPOS

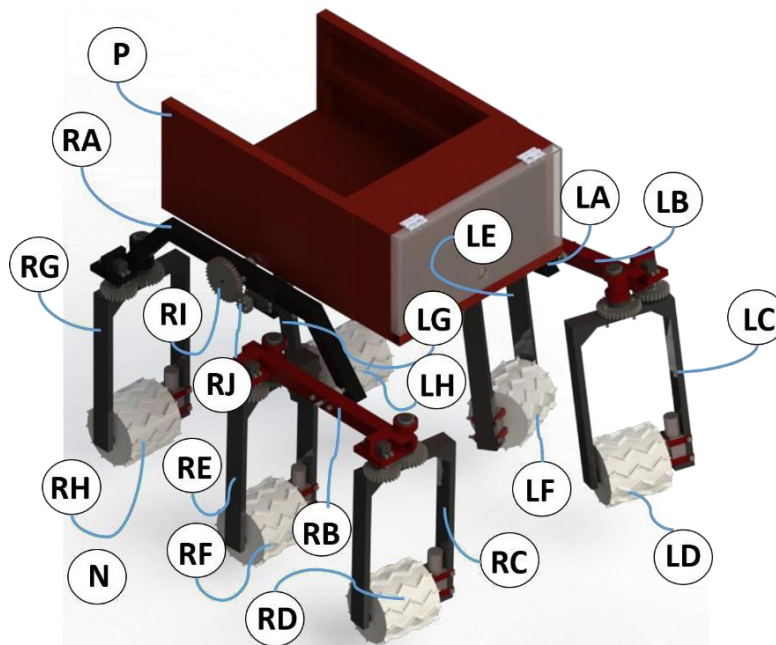


Ilustración 41 Nombre de los cuerpos.

Inicialmente, observamos que la parte izquierda y la parte derecha tienen la misma configuración, por tal motivo se decidió tomar un par de letras como generales del

sistema Rocker-Bogie, las elegidas fueron la R (right) para el mecanismo del lado derecho y la L (left) para el mecanismo del lado izquierdo, luego se nombraron las partes de cada lado con una letra adicional, y se incluyeron dos letras sin acompañante, la letra P que nombra a la placa diseñada y la letra N que nombra a la tierra (sistema Newtoniano), de esta manera será más fácil identificar el cuerpo del que se habla.

Tabla 4 Listado de siglas.

SIGLA	DESCRIPCIÓN
RA	Rocker derecho
RB	Bogie derecho
RC	C1 derecha
RD	Llanta 1 derecha
RE	C2 derecha
RF	Llanta 2 derecha
RG	C3 derecha
RH	Llanta 3 derecha
RI	Piñón eje
RJ	Piñón motor
N	Sistema newtoniano
LA	Rocker izquierdo
LB	Bogie izquierdo
LC	C1 izquierdo
LD	Llanta 1 izquierdo
LE	C2 izquierdo
LF	Llanta 2 izquierdo
LG	C3 izquierdo
P	Placa
LH	Llanta 3 izquierdo

4.5.1.2. SISTEMAS COORDENADOS

Posteriormente se procedió a ubicar sistemas coordenados en cada cuerpo para tener referencias en cada uno de estos, cada sistema coordinado tiene de nombre la letra que acompaña a las letras generales (R y L) y solamente se ubican en uno de los dos lados debido a que, como ya se había mencionado antes, estos mecanismos son iguales, también se incluyó un sistema coordinado en la tierra, tal y como se muestra a continuación.

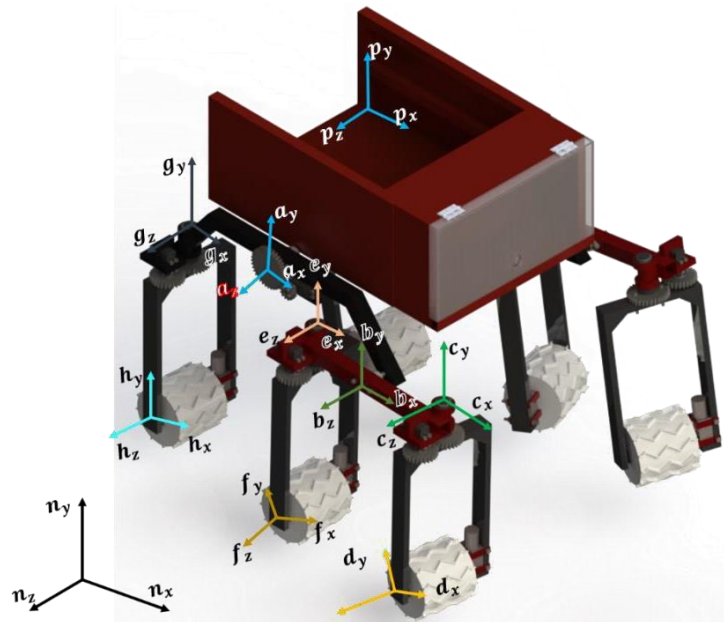


Ilustración 42 Sistemas coordenados.

4.5.1.3. PUNTOS CLAVE

Luego de definir los sistemas de coordenados que se utilizaron en el sistema, se ubicaron puntos que se consideraron importantes para el modelamiento matemático del sistema, como se muestra en la siguiente imagen.

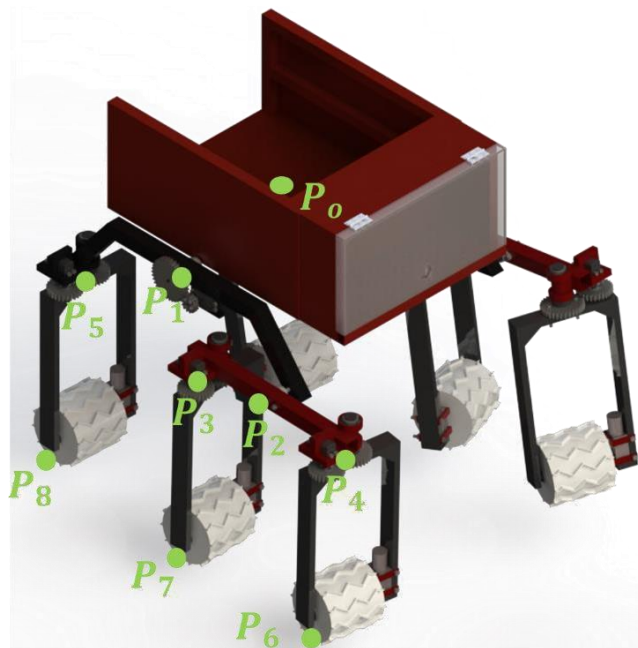


Ilustración 43 Puntos clave del mecanismo.

4.5.1.4. PARÁMETROS

Para realizar un modelo matemático general para cualquier sistema con el mecanismo rocker bogie, se parametrizaron las longitudes del mecanismo, los nombres de las variables están relacionadas en la siguiente imagen.

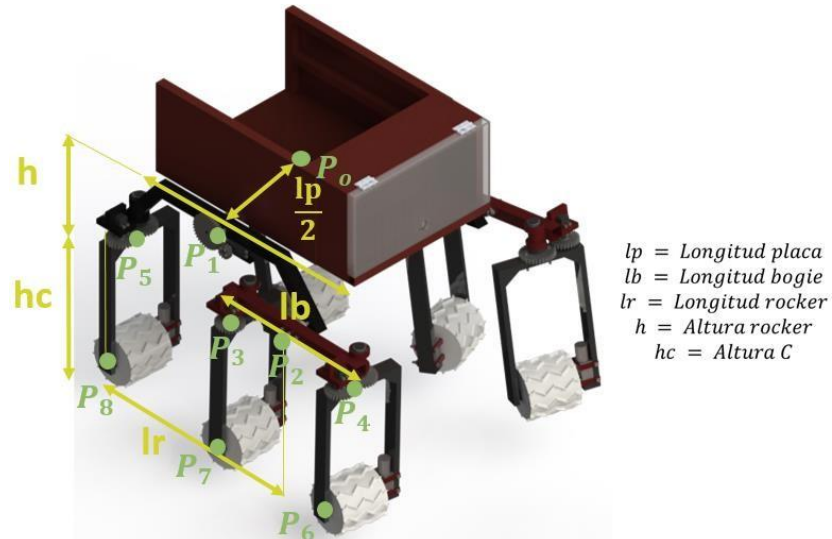


Ilustración 44 Parámetros del rocker bogie.

Además de las medidas mostradas anteriormente se definieron parámetros para las distancias entre un punto clave y el centroide de cada cuerpo lo cual se detalla en las siguientes imágenes (incluyendo las medidas especificadas arriba), al final de este apartado se podrá encontrar una tabla la cual relaciona la variable con su significado.

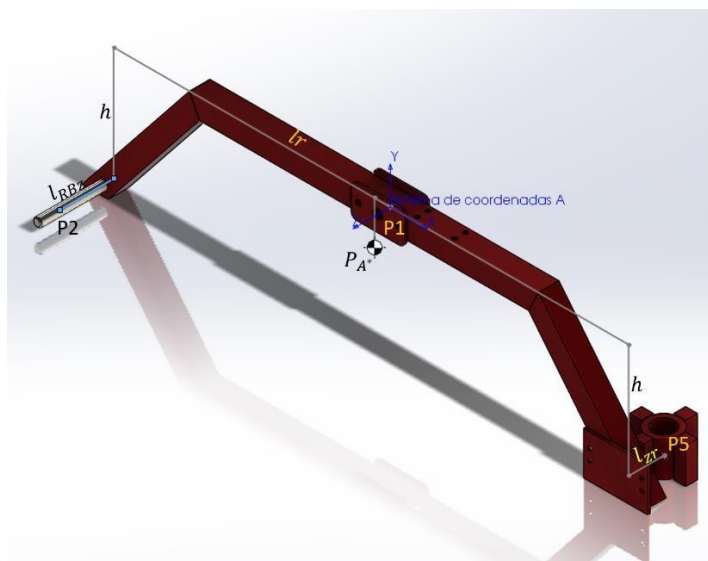


Ilustración 45 Parámetros de distancia en el rocker.

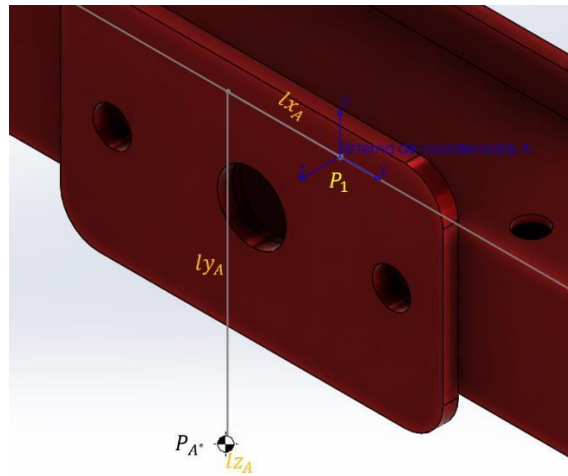


Ilustración 46 Parámetros de distancias al centroide del rocker desde el punto P1.

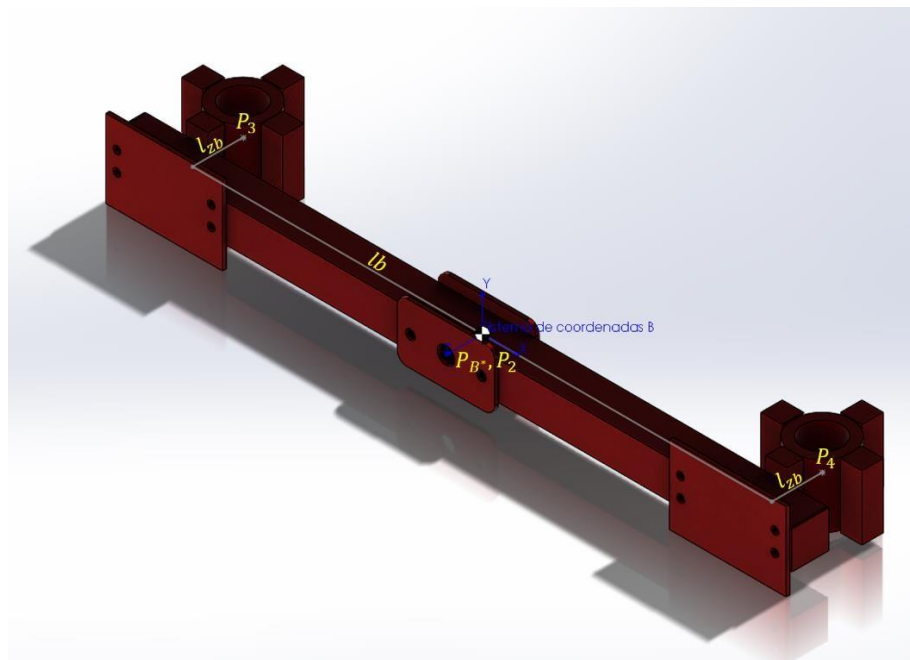


Ilustración 47 Parámetros de distancias en el bogie.

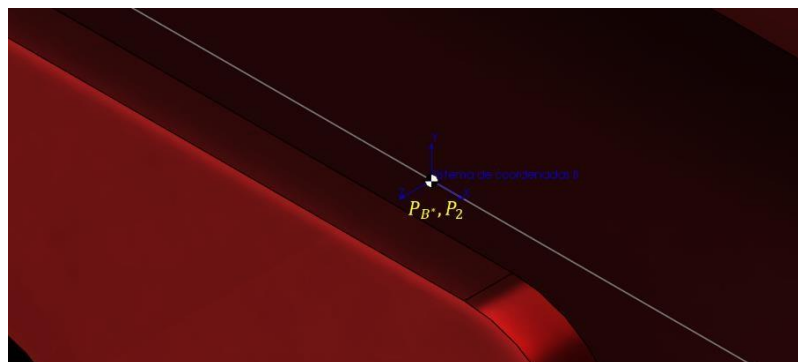


Ilustración 48 Parámetros de distancias entre el centroide del bogie y el punto P2.

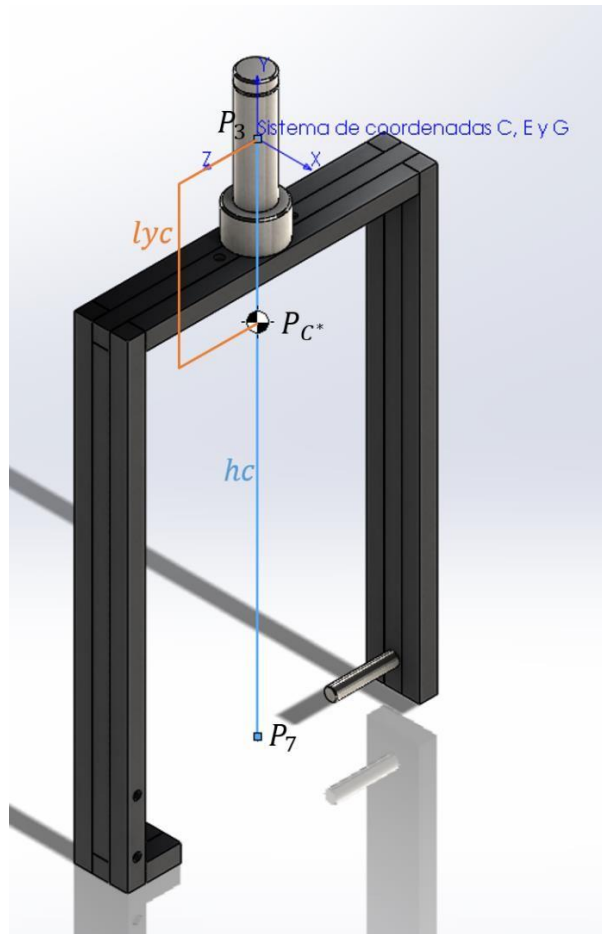


Ilustración 49 Parámetros de distancias en la c.

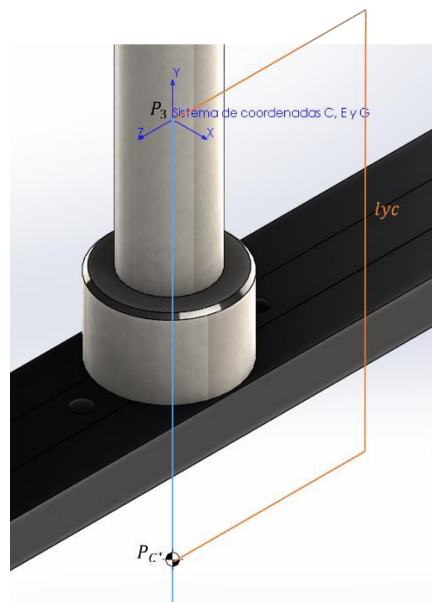


Ilustración 50 Parámetros de distancia entre el centroide de la "c" y el punto P_3 .

Tabla 5 Parámetros de distancia con su significado.

PARAMETRO	SIGNIFICADO	PARAMETRO	SIGNIFICADO
l_r	Longitud del rocker en x	l_{zA}	Longitud entre el punto P1 y el centroide del rocker en z
h	Altura del rocker en y	l_b	Longitud del bogie en x
l_{zr}	Longitud en z del rocker	l_{zb}	Longitud entre el punto P2 y los puntos P3 y P4 en z
l_{RBz}	Longitud entre el rocker y el bogie en z	h_c	Altura de la c en y
l_{xA}	Longitud entre el punto P1 y el centroide del rocker en x	l_{yc}	Longitud entre el punto P3 y el centroide de la c
l_{yA}	Longitud entre el punto P1 y el centroide del rocker en y	l_p	Longitud de la placa

4.5.1.5. ÁNGULOS DE LOS CUERPOS

Luego se ubicaron los ángulos con respecto a los cuales giran los cuerpos, de la siguiente manera.

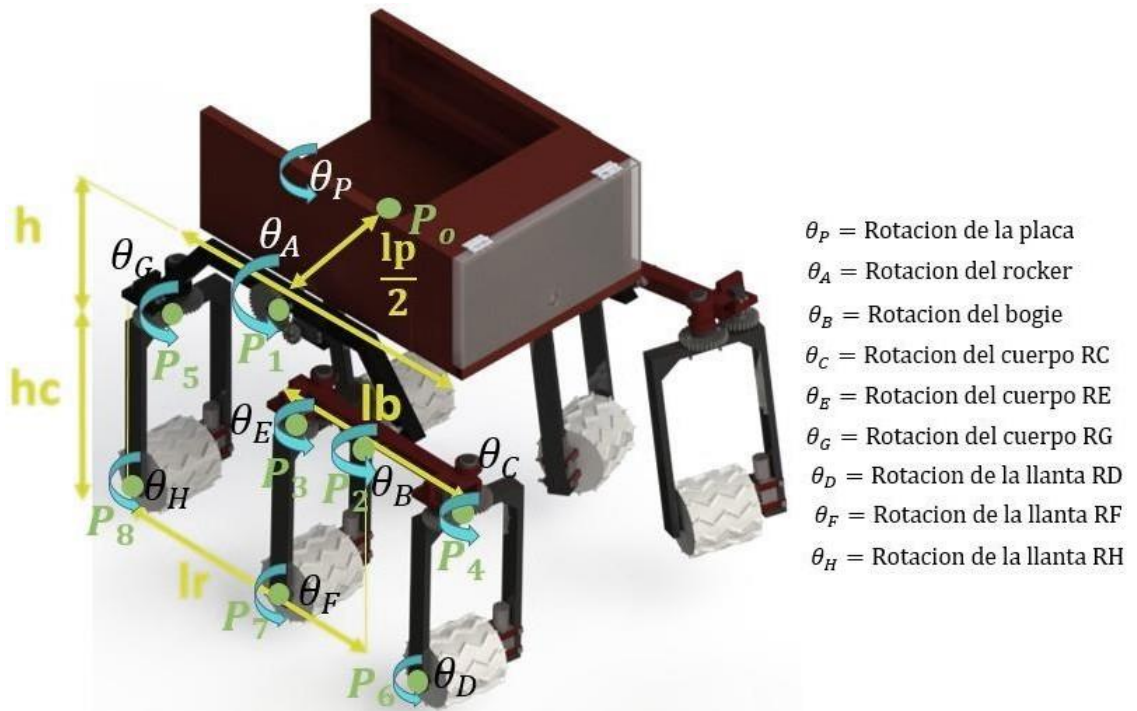


Ilustración 51 Ángulos de los cuerpos.

Se tomaron unos ángulos relativos de ciertos ángulos con respecto a otros.

$$\theta_1 = \theta_P - \theta_A$$

$$\theta_2 = \theta_A - \theta_B$$

$$\theta_3 = \theta_C - \theta_B$$

$$\theta_4 = \theta_E - \theta_B$$

$$\theta_5 = \theta_G - \theta_A$$

$$\theta_6 = \theta_D - \theta_C$$

$$\theta_7 = \theta_F - \theta_E$$

$$\theta_8 = \theta_H - \theta_6$$

4.5.1.6. MATRICES DE ROTACIÓN

Con los ángulos obtenidos anteriormente, se realizaron las matrices de rotación necesarias para describir todo el tiempo la posición, la velocidad y la aceleración de puntos claves mencionados, dichas matrices se muestran a continuación.

$${}^a C^p = \begin{bmatrix} \text{Cos}(\theta_1) & -\text{Sen}(\theta_1) & 0 \\ \text{Sen}(\theta_1) & \text{Cos}(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 14 Matriz de rotación de P a A.

$${}^b C^a = \begin{bmatrix} \text{Cos}(\theta_2) & -\text{Sen}(\theta_2) & 0 \\ \text{Sen}(\theta_2) & \text{Cos}(\theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 15 Matriz de rotación de A a B.

$${}^c C^b = \begin{bmatrix} \text{Cos}(\theta_3) & 0 & \text{Sen}(\theta_3) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{Sen}(\theta_3) & 0 & \text{Cos}(\theta_3) \end{bmatrix}$$

Ecuación 16 Matriz de rotación de B a C.

$${}^e C^b = \begin{bmatrix} \text{Cos}(\theta_4) & 0 & \text{Sen}(\theta_4) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{Sen}(\theta_4) & 0 & \text{Cos}(\theta_4) \end{bmatrix}$$

Ecuación 17 Matriz de rotación de B a E.

$${}^g C^a = \begin{bmatrix} \text{Cos}(\theta_5) & 0 & \text{Sen}(\theta_5) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{Sen}(\theta_5) & 0 & \text{Cos}(\theta_5) \end{bmatrix}$$

Ecuación 18 Matriz de rotación de A a G.

$${}^p C^a = {}^a C^{p'}$$

Ecuación 19 Matriz de rotación de A a P.

$${}^a C^b = {}^b C^{a'}$$

Ecuación 20 Matriz de rotación de B a A.

$${}^b C^c = {}^c C^{b'}$$

Ecuación 21 Matriz de rotación de C a B.

$${}^b C^e = {}^e C^{b'}$$

Ecuación 22 Matriz de rotación de E a B.

$${}^a C^g = {}^g C^{a'}$$

Ecuación 23 Matriz de rotación de G a A.

4.5.1.7. POSICIONES

Luego de obtener las matrices de rotación se obtuvieron las coordenadas desde el punto \vec{P}_0 hacia todos los demás puntos ubicados estratégicamente, dando como resultado las siguientes ecuaciones.

$$\vec{P}_0 = x\hat{p} + y\hat{p} + z\hat{p}$$

Ecuación 24 Punto P_0 .

$$\vec{P}_1 = \vec{P}_0 + \frac{l}{2} \hat{a}_z$$

Ecuación 25 Punto P_1 .

$$\vec{P}_2 = \vec{P}_1 + \frac{l}{2} \hat{a}_x - \hat{a}_y + l_{RBz} \hat{a}_z$$

Ecuación 26 Punto P_2 .

$$\vec{P}_3 = \vec{P}_2 - \frac{l}{2} \hat{b}_x - l_{zb} \hat{a}_z$$

Ecuación 27 Punto P_3 .

$$P_4 = P_2 + \frac{l}{2} \hat{b}_x - l_{zb} \hat{a}_z$$

Ecuación 28 Punto P_4 .

$$\vec{P}_5 = \vec{P}_1 - \frac{l}{2} \hat{a}_x - \hat{a}_y + l_{zr} \hat{a}_z$$

Ecuación 29 Punto P_5 .

$$\vec{P}_6 = \vec{P}_4 - h\hat{c}_y$$

Ecuación 30 Punto P_6 .

$$\vec{P}_7 = \vec{P}_3 - h\hat{c}_y$$

Ecuación 31 Punto P_7 .

$$\vec{P}_8 = \vec{P}_5 - h\hat{c}_y$$

Ecuación 32 Punto P_8 .

Además de los puntos clave también fue necesario ubicar los centroides de los cuerpos a partir de los puntos, y obtenemos las siguientes ecuaciones.

$$\vec{P}_{A^*} = \vec{P}_1 - l_{xA} \hat{a}_x - l_{yA} \hat{a}_y - l_{zA} \hat{a}_z$$

Ecuación 33 Ubicación del centroide del cuerpo A medido desde P_0 .

$$P_{B^*} = P_1 + \frac{l}{2} \hat{a}_x - \hat{a}_y + l_{ABz} \hat{a}_z = P_2$$

Ecuación 34 Ubicación del centroide del cuerpo B medido desde P_0 .

$$\vec{P}_{C^*} = \vec{P}_4 - ly_C \hat{c}$$

Ecuación 35 Ubicación del centroide del cuerpo C medido desde P0.

$$\vec{P}_{E^*} = \vec{P}_3 - ly_E \hat{e}$$

Ecuación 36 Ubicación del centroide del cuerpo E medido desde P0.

$$\vec{P}_{G^*} = \vec{P}_5 - ly_G \hat{g}$$

Ecuación 37 Ubicación del centroide del cuerpo G medido desde P0.

También fueron necesarios vectores posición de ciertos puntos a otros para el método, estos vectores son requeridos para el cálculo de velocidades, aceleraciones y para los momentos.

$$\vec{r}_{P_0P_1} = \vec{P}_1 - \vec{P}_0 = \frac{lp}{2} \hat{a}_z$$

Ecuación 38 Posición del punto P0 al punto P1.

$$\vec{r}_{P_1P_2} = \vec{P}_2 - \vec{P}_1 = \frac{lr}{2} \hat{a}_x - \frac{hr}{2} \hat{a}_y + l \hat{a}_z$$

Ecuación 39 Posición del punto P1 al punto P2.

$$\vec{r}_{P_2P_3} = \vec{P}_3 - \vec{P}_2 = -\frac{lb}{2} \hat{a}_x - l \hat{a}_z$$

Ecuación 40 Posición del punto P2 al punto P3.

$$\vec{r}_{P_2P_4} = \vec{P}_4 - \vec{P}_2 = \frac{lb}{2} \hat{a}_x - l \hat{a}_z$$

Ecuación 41 Posición del punto P2 al punto P4.

$$\vec{r}_{P_1P_5} = \vec{P}_5 - \vec{P}_1 = -\frac{lr}{2} \hat{a}_x - \frac{hr}{2} \hat{a}_y + l \hat{a}_z$$

Ecuación 42 Posición del punto P1 al punto P5.

$$\vec{r}_{P_4P_6} = \vec{P}_6 - \vec{P}_4 = -hc \hat{c}$$

Ecuación 43 Posición del punto P4 al punto P6.

$$\vec{r}_{P_3P_7} = \vec{P}_7 - \vec{P}_3 = -hc \hat{e}$$

Ecuación 44 Posición del punto P3 al punto P7.

$$\vec{r}_{P_5P_8} = \vec{P}_8 - \vec{P}_5 = -hc \hat{g}$$

Ecuación 45 Posición del punto P5 al punto P8.

$$\vec{r}_{A^*P_1} = \vec{P}_1 - \vec{P}_{A^*} = lx_A \hat{a}_x + ly_A \hat{a}_y + lz_A \hat{a}_z$$

Ecuación 46 Posición del punto P_{A^*} al punto P_1 .

$$\vec{r}_{P_{A^*}P_2} = P_2 - P_{A^*} = lx_A \hat{a}_x + ly_A \hat{a}_y + lz_A \hat{a}_z + \frac{lr}{2} \hat{a}_x - h \hat{a}_y + l_{RBz} \hat{a}_z$$

Ecuación 47 Posición del punto P_{A^*} al punto P_2 .

$$\vec{r}_{P_{A^*}P_5} = P_5 - P_{A^*} = lx_A \hat{a}_x + ly_A \hat{a}_y + lz_A \hat{a}_z - \frac{lr}{2} \hat{a}_x - h \hat{a}_y + l_{RBz} \hat{a}_z$$

Ecuación 48 Posición del punto P_{A^*} al punto P_5 .

$$\vec{r}_{P_{B^*}P_2} = \vec{P}_2 - \vec{P}_{B^*} = 0$$

Ecuación 49 Posición del punto P_{B^*} al punto P_2 .

$$\vec{r}_{P_{B^*}P_3} = P_3 - P_{B^*} = -\frac{lb_x}{2} b_x - l_{zb} \hat{a}_z$$

Ecuación 50 Posición del punto P_{B^*} al punto P_3 .

$$\vec{r}_{P_{B^*}P_4} = P_4 - P_{B^*} = \frac{lb_x}{2} b_x - l_{zb} \hat{a}_z$$

Ecuación 51 Posición del punto P_{B^*} al punto P_4 .

$$\vec{r}_{P_{C^*}P_4} = \vec{P}_4 - \vec{P}_{C^*} = ly_C \hat{c}_y$$

Ecuación 52 Posición del punto P_{C^*} al punto P_4 .

$$\vec{r}_{P_{C^*}P_6} = \vec{P}_6 - \vec{P}_{C^*} = -hc \hat{c}_y + ly_C \hat{c}_y$$

Ecuación 53 Posición del punto P_{C^*} al punto P_6 .

$$\vec{r}_{P_{E^*}P_3} = \vec{P}_3 - \vec{P}_{E^*} = ly_E \hat{e}_y$$

Ecuación 54 Posición del punto P_{E^*} al punto P_3 .

$$\vec{r}_{P_{E^*}P_7} = \vec{P}_7 - \vec{P}_{E^*} = -hc \hat{e}_y + ly_E \hat{e}_y$$

Ecuación 55 Posición del punto P_{E^*} al punto P_7 .

$$\vec{r}_{P_{G^*}P_5} = \vec{P}_5 - \vec{P}_{G^*} = ly_G \hat{g}_y$$

Ecuación 56 Posición del punto P_{G^*} al punto P_5 .

$$\vec{r}_{P_{G^*}P_8} = \vec{P}_8 - \vec{P}_{G^*} = -hc \hat{g}_y + ly_G \hat{g}_y$$

Ecuación 57 Posición del punto P_{G^*} al punto P_8 .

4.5.1.8. VELOCIDADES

Posteriormente se procedió a calcular las velocidades, primero que todo de los puntos en la base local de los cuerpos, para esto, se tuvo en cuenta la ecuación 3 y se presentarán los vectores de velocidad de cada punto. El procedimiento para llegar a los siguientes resultados se encuentra de manera detallada en los anexos de este documento.

Inicialmente, se parte de la velocidad del punto P0 la cual es un parámetro de entrada para el método, dicha velocidad es necesaria para hallar el vector de velocidad del siguiente punto clave, y la nueva velocidad para el siguiente punto clave y así sucesivamente. Para la simplificación de las ecuaciones de aquí en adelante se utilizará la siguiente notación para los senos y cosenos de los ángulos:

$$\text{Cos}(\theta_i) = C_i \quad \text{Sen}(\theta_i) = S_i$$

$${}^N\vec{V}^{P_0} = V_x \hat{x} + V_y \hat{y} + V_z \hat{z}$$

Ecuación 58 Velocidad del punto P0 vista desde el sistema newtoniano en base P.

$${}^N\vec{V}^{P_1} = (V_x C_1 + V_y S_1) \hat{a} + (-V_x S_1 + V_y C_1) \hat{b} + V_z \hat{a}$$

Ecuación 59 Velocidad del punto P1 vista desde el sistema newtoniano en base A.

$${}^N\vec{V}^{P_2} = \left[(V_{x1} + V_{y1} S_A + h\theta \mathcal{C}_A + (V_{y1} C_A - V_{x1} S_A + \frac{lr}{2} \dot{\theta}) S_A \right] \hat{b}_x + \left[(V_{y1} C_A - V_{x1} S_A + \frac{lr}{2} \dot{\theta}) C_A - (V_{x1} C_A + V_{y1} S_A + h\theta \mathcal{S}_A) S_A \right] \hat{b}_y + V_z \hat{b}_z$$

Ecuación 60 Velocidad del punto P2 vista desde el sistema newtoniano en base B.

$${}^N\vec{V}^{P_3} = \left[(V_{x1} + V_{y1} S_A + h\theta \mathcal{C}_A + (V_{y1} C_A - V_{x1} S_A + \frac{lr}{2} \dot{\theta}) S_A \right] \hat{b}_x + \left[(V_{y1} C_A - V_{x1} S_A + \frac{lr}{2} \dot{\theta}) C_A - (V_{x1} C_A + V_{y1} S_A + h\theta \mathcal{S}_A) S_A - \frac{lb}{2} \dot{\theta} \right] \hat{b}_y + V_z \hat{b}_z$$

Ecuación 61 Velocidad del punto P3 vista desde el sistema newtoniano en base B.

$${}^N\vec{V}^{P_4} = \left\{ \left[(V_{x1} + V_{y1} S_A + h\theta \mathcal{C}_A + (V_{y1} C_A - V_{x1} S_A + \frac{lr}{2} \dot{\theta}) S_A \right] C_A - V_z \right\} \hat{c}_x + \left[(V_{y1} C_A - V_{x1} S_A + \frac{lr}{2} \dot{\theta}) C_A - (V_{x1} C_A + V_{y1} S_A + h\theta \mathcal{S}_A) S_A + \frac{lb}{2} \dot{\theta} \right] \hat{c}_y + \left\{ \left[(V_{x1} C_A + V_{y1} S_A + h\theta \mathcal{S}_A) S_A + (V_{y1} C_A - V_{x1} S_A + \frac{lr}{2} \dot{\theta}) S_A \right] S_A + V_z \right\} \hat{c}_z$$

Ecuación 62 Velocidad del punto P4 vista desde el sistema newtoniano en base C.

$${}^N\vec{v}^{P_6} = {}^N\vec{v}^{P_4}$$

Ecuación 63 Velocidad del punto P6 vista desde el sistema newtoniano en base C.

$$\begin{aligned} {}^N\vec{v}^{P_3} = & \{ [(V_{x1} + V_{y1} S + h\theta_A \mathcal{C} + (V_{y1} C - V_{x1} S + \frac{lr}{2} \theta_A) S] C - V_{z4} S \} e_x \\ & + [(V_{y1} C - V_{x1} S + \frac{lr}{2} \theta_A) C - (V_{x1} C + V_{y1} S + h\theta_A \mathcal{S} - \frac{lr}{2} \dot{\theta}_B)] e_y \\ & + \{ [(V_{x1} C + V_{y1} S + h\theta_A \mathcal{C} + (V_{y1} C - V_{x1} S + \frac{lr}{2} \theta_A) S] S + V_{z4} \} \hat{e}_z \end{aligned}$$

Ecuación 64 Velocidad del punto P3 vista desde el sistema newtoniano en base E.

$${}^N\vec{v}^{P_7} = {}^N\vec{v}^{P_3}$$

Ecuación 65 Velocidad del punto P7 vista desde el sistema newtoniano en base E.

$$\begin{aligned} {}^N\vec{v}^{P_5} = & [(V_{x1} C + V_{y1} S + h\theta_A \mathcal{C} - V_{z5}) \hat{g}_x + (C \hat{g}_x + S \hat{g}_y) + [V_{y1} C - V_{x1} S - \frac{lr}{2} \dot{\theta}_A] \hat{g}_y \\ & + [(V_x C_1 + V_y S_1 + h\theta_A) S_5 + V_z C_5] \hat{g} \end{aligned}$$

Ecuación 66 Velocidad del punto P5 vista desde el sistema newtoniano en base G.

$${}^N\vec{v}^{P_8} = {}^N\vec{v}^{P_5}$$

Ecuación 67 Velocidad del punto P8 vista desde el sistema newtoniano en base G.

Por medio de las matrices de rotación se toman las velocidades anteriormente halladas de los puntos en cada cuerpo y se transforman a las velocidades al sistema de referencia del cuerpo A, para que, al aplicar la solución numérica, los datos hallados tengan concordancia entre ellos debido a que se solucionará todo en un solo sistema de ecuaciones.

4.5.1.9. ACELERACIONES

Finalmente se calcularon las aceleraciones por medio de la ecuación general planteada (ecuación 4) y partiendo de valores conocidos del punto "P0". Como se mencionaba en las velocidades, todas las siguientes aceleraciones a la planteada como inicial dependerán de esta, por tal motivo esta aceleración del punto "P0" se convierte en otro parámetro de entrada para el modelo.

$${}^N\vec{a}^{P_0} = a_x \hat{x} + a_y \hat{y} + a_z \hat{z}$$

Ecuación 68 Aceleración del punto P0 vista desde el sistema newtoniano en base P.

$${}^N\vec{a}^{P1} = (a_x C_1 + a_y S_1)\hat{a} + (-a_x S_1 + a_y C_1)\hat{b} + a_z \hat{a}$$

Ecuación 69 Aceleración del punto P1 vista desde el sistema newtoniano en base A.

$${}^N\vec{a}^{P2} = \left[(a_{x1} C_1 + a_{y1} S_1 + h\theta + lr^2) C_2 + (a_y C_1 - a_x S_1 + \frac{lr\theta + h^2}{2}) S_2 \right] b_x + \left[(a_{y1} C_1 - a_{x1} S_1 + \frac{lr\theta + h^2}{2}) C_2 - (a_x C_1 + a_y S_1 + \frac{h\theta + lr^2}{2}) S_2 \right] b_y + a_z b_z$$

Ecuación 70 Aceleración del punto P2 vista desde el sistema newtoniano en base B.

$${}^N\vec{a}^{P3} = \left[(a_{x1} C_1 + a_{y1} S_1 + h\theta + lr^2) C_2 + (a_y C_1 - a_x S_1 + \frac{lr\theta + h^2}{2}) S_2 - \frac{\ddot{\theta}_B lb}{2} \right] b_x + \left[(a_{y1} C_1 - a_{x1} S_1 + \frac{lr\theta + h^2}{2}) C_2 - (a_x C_1 + a_y S_1 + \frac{h\theta + lr^2}{2}) S_2 + \frac{\ddot{\theta}_B lb}{2} \right] b_y + a_z b_z$$

Ecuación 71 Aceleración del punto P3 vista desde el sistema newtoniano en base B.

$${}^N\vec{a}^{P4} = \left[(a_{x1} C_1 + a_{y1} S_1 + h\theta + lr^2) C_2 + (a_y C_1 - a_x S_1 + \frac{lr\theta + h^2}{2}) S_2 - \frac{\ddot{\theta}_B lb}{2} \right] b_x + \left[(a_{y1} C_1 - a_{x1} S_1 + \frac{lr\theta + h^2}{2}) C_2 - (a_x C_1 + a_y S_1 + \frac{h\theta + lr^2}{2}) S_2 + \frac{\ddot{\theta}_B lb}{2} \right] b_y + a_z b_z$$

Ecuación 72 Aceleración del punto P4 vista desde el sistema newtoniano en base B.

$${}^N\vec{a}^{P5} = (a_{x1} C_1 + a_{y1} S_1 + h\theta + lr^2) \hat{a} + (-a_x S_1 + a_y C_1 - \frac{lr\theta + h^2}{2}) \hat{b} + a_z \hat{a}$$

Ecuación 73 Aceleración del punto P5 vista desde el sistema newtoniano en base A.

$$\begin{aligned}
{}^N\vec{a}^{P_3} = \{ & [(a_{x1} + a_{y1} S_A + h\theta_A + lr_A^2) C_2 + (a_y C_1 - a_x S_1 + \frac{lr_A \theta_A + h_A^2}{2}) S_2 \\
& + lb \frac{\theta_B}{2}] C_4 - a_z S_4 \} \hat{e} \\
& + \{ [(a_{y1} C_1 - a_{x1} S_1 + \frac{lr_A \theta_A + h_A^2}{2}) C_2 - (a_x C_1 + a_y S_1 + \frac{h\theta_A + lr_A^2}{2}) S_2 \\
& + \frac{\theta_B lb}{2}] \hat{e} \\
& + \{ [(a_{x1} C_1 + a_{y1} S_1 + h\theta_A + lr_A^2) C_2 + (a_y C_1 - a_x S_1 + \frac{lr_A \theta_A + h_A^2}{2}) S_2 \\
& + lb \frac{\theta_B}{2}] S_4 + a_z C_4 \} \hat{e}
\end{aligned}$$

Ecuación 74 Aceleración del punto P3 vista desde el sistema newtoniano en base E.

$${}^N\vec{a}^{P_7} = {}^N\vec{a}^{P_3}$$

Ecuación 75 Aceleración del punto P7 vista desde el sistema newtoniano en base E.

$$\begin{aligned}
{}^N\vec{a}^{P_4} = \{ & [(a_{x1} + a_{y1} S_A + h\theta_A + lr_A^2) C_2 + (a_y C_1 - a_x S_1 + \frac{lr_A \theta_A + h_A^2}{2}) S_2 \\
& - lb \frac{\theta_B}{2}] C_3 - a_z S_3 \} \hat{c}_x \\
& + \{ [(a_{y1} C_1 - a_{x1} S_1 + \frac{lr_A \theta_A + h_A^2}{2}) C_2 - (a_x C_1 + a_y S_1 + \frac{h\theta_A + lr_A^2}{2}) S_2 \\
& + \frac{\theta_B lb}{2}] \hat{c}_y \\
& + \{ [(a_{x1} C_1 + a_{y1} S_1 + h\theta_A + lr_A^2) C_2 + (a_y C_1 - a_x S_1 + \frac{lr_A \theta_A + h_A^2}{2}) S_2 \\
& - lb \frac{\theta_B}{2}] S_3 + a_z C_3 \} \hat{c}_z
\end{aligned}$$

Ecuación 76 Aceleración del punto P4 vista desde el sistema newtoniano en base C.

$${}^N\vec{a}^{P_6} = {}^N\vec{a}^{P_4}$$

Ecuación 77 Aceleración del punto P6 vista desde el sistema newtoniano en base C.

$$\begin{aligned}
{}^N\vec{a}^{P_5} = & [(a_{x1} + a_{y1} S + h\theta + lr^2 - \frac{\theta_A}{2}) C_5 + a_z S_5] \hat{g} \\
& + [a_{y1} C - a_{x1} S - \frac{2lr\theta}{2} + h\theta_A^2] \hat{g} \\
& + [(a_{x1} C + a_{y1} S + h\theta + lr^2 - \frac{\theta_A}{2}) S_5 + a_z C_5] \hat{g}
\end{aligned}$$

Ecuación 78 Aceleración del punto P5 vista desde el sistema newtoniano en base G.

$${}^N\vec{a}^{P_8} = {}^N\vec{a}^{P_5}$$

Ecuación 79 Aceleración del punto P8 vista desde el sistema newtoniano en base G.

Al igual que las velocidades, en las aceleraciones también se utilizaron las matrices de transformación para pasar estas al sistema de referencia del cuerpo A y posteriormente usarlas en el sistema de ecuaciones.

4.5.2. CINÉTICA

En esta sección se presentarán las ecuaciones de fuerza y momento que rigen el funcionamiento del vehículo, también se presentará la matriz que contiene todas las ecuaciones de fuerzas y momentos obtenidas de cada uno de los cuerpos con sus respectivas variables, y, finalmente el modelamiento de la interacción de las ruedas del vehículo con el terreno por el cual se desplazan, cabe aclarar que estas ecuaciones aplican para cualquier tipo de terreno.

4.5.2.1. CÁLCULO DE REACCIONES INTERNAS

Inicialmente se realizó el diagrama de cuerpo libre (DCL) de cada uno de los cuerpos que componen el mecanismo Rocker – Bogie. Debido a la extensión del documento se presentará en esta sección solo el DCL y las ecuaciones de fuerza y momento del cuerpo rocker (nombrado en la parte superior como RA) y el diagrama y las ecuaciones de los otros cuerpos se evidenciarán en los anexos.

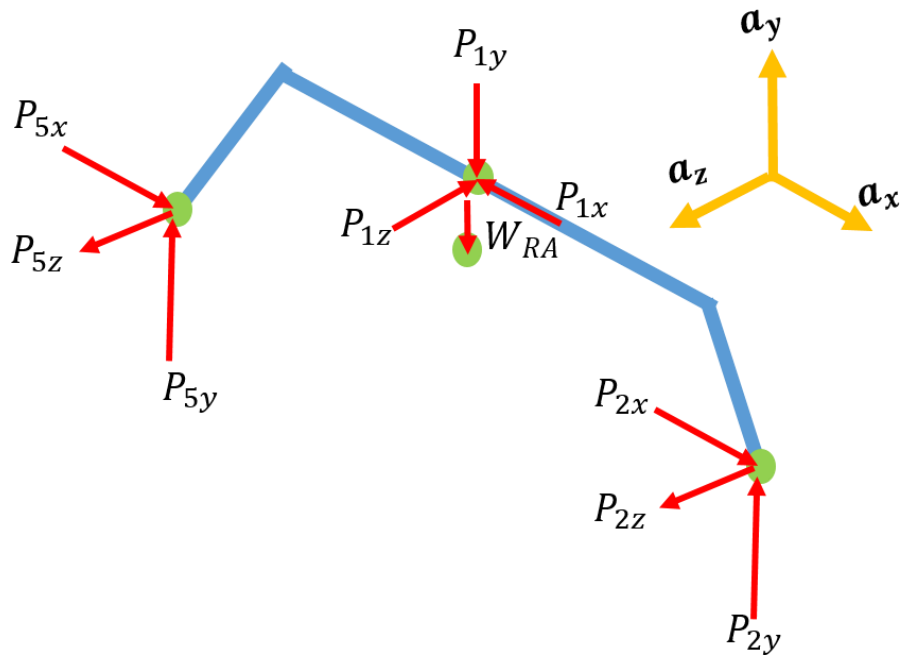


Ilustración 52 DCL del rocker.

En el anterior DCL se puede observar la ubicación de las fuerzas presentes en el cuerpo, que al aplicar la segunda ley de Newton (sumatoria de fuerza) obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$F_{P2} - F_{P1} + F_{P5} - W_{RA} = {}^N a_{RA^*} \cdot m_{RA}$$

Ecuación 80 Sumatoria de fuerzas del rocker.

$$F_{P2x} - F_{P1x} + F_{P5x} = {}^N a_{RA^*x} \cdot m_{RA}$$

Ecuación 81 Sumatoria de fuerzas de rocker en x.

$$F_{P2y} - F_{P1y} + F_{P5y} - W_{RA} = {}^N a_{RA^*y} \cdot m_{RA}$$

Ecuación 82 Sumatoria de fuerzas de rocker en y.

$$F_{P2z} - F_{P1z} + F_{P5z} = {}^N a_{RA^*z} \cdot m_{RA}$$

Ecuación 83 Sumatoria de fuerzas de rocker en z.

Para el caso de los momentos se eligió el centroide del cuerpo para hacer la sumatoria de momentos, por lo tanto, al realizar el desarrollo matemático se obtendrían las siguientes ecuaciones:

$$F_{P2} \times \vec{r}_{P_A^*P_2} - F_{P1} \times \vec{r}_{P_A^*P_1} + F_{P5} \times \vec{r}_{P_A^*P_5} = \vec{I}^A/A^* \cdot {}^N \vec{\alpha}^A + N \vec{\omega}^A \times (\vec{I}^A/A^* \cdot N \vec{\omega}^A)$$

Ecuación 84 Sumatoria de momentos del rocker.

$$\begin{aligned}
& N_{r_{PA^*P1y}} \cdot F_{P1z} - N_{r_{PA^*P1z}} \cdot F_{P1y} - N_{r_{PA^*P2y}} \cdot F_{P2z} + N_{r_{PA^*P2z}} \cdot F_{P2y} - N_{r_{PA^*P5y}} \\
& \quad \cdot F_{P5z} + N_{r_{PA^*P5z}} \cdot F_{P5y} \\
& = \theta_{Ay} \cdot (I_{aa31} \cdot \theta_{Ax} + I_{aa32} \cdot \theta_{Ay} + I_{aa33} \cdot \theta_{Az}) - \theta_{Az} \\
& \quad \cdot (I_{aa21} \cdot \theta_{Ax} + I_{aa22} \cdot \theta_{Ay} + I_{aa23} \cdot \theta_{Az}) + I_{aa11} \cdot \theta_{Ax} + I_{aa12} \cdot \theta_{Ay} \\
& \quad + I_{aa13} \cdot \theta_{Az}
\end{aligned}$$

Ecuación 85 Sumatoria de momentos de rocker en x.

$$\begin{aligned}
& N_{r_{PA^*P1z}} \cdot F_{P1x} - N_{r_{PA^*P1x}} \cdot F_{P1z} + N_{r_{PA^*P2z}} \cdot F_{P2x} - N_{r_{PA^*P2x}} \cdot F_{P2z} + N_{r_{PA^*P5z}} \cdot F_{P5x} \\
& \quad - N_{r_{PA^*P5x}} \cdot F_{P5z} \\
& = \theta_{Az} \cdot (I_{aa11} \cdot \theta_{Ax} + I_{aa12} \cdot \theta_{Ay} + I_{aa13} \cdot \theta_{Az}) - \theta_{Ax} \\
& \quad \cdot (I_{aa31} \cdot \theta_{Ax} + I_{aa32} \cdot \theta_{Ay} + I_{aa33} \cdot \theta_{Az}) + I_{aa21} \cdot \theta_{Ax} + I_{aa22} \cdot \theta_{Ay} \\
& \quad + I_{aa23} \cdot \theta_{Az}
\end{aligned}$$

Ecuación 86 Sumatoria de momentos de rocker en y.

$$\begin{aligned}
& N_{r_{PA^*P1x}} \cdot F_{P1y} - N_{r_{PA^*P1y}} \cdot F_{P1x} - N_{r_{PA^*P2x}} \cdot F_{P2y} + N_{r_{PA^*P2y}} \cdot F_{P2x} - N_{r_{PA^*P5x}} \cdot F_{P5y} \\
& \quad + N_{r_{PA^*P5y}} \cdot F_{P5x} \\
& = \theta_{Ax} \cdot (I_{aa21} \cdot \theta_{Ax} + I_{aa22} \cdot \theta_{Ay} + I_{aa23} \cdot \theta_{Az}) - \theta_{Ay} \\
& \quad \cdot (I_{aa11} \cdot \theta_{Ax} + I_{aa12} \cdot \theta_{Ay} + I_{aa13} \cdot \theta_{Az}) + I_{aa31} \cdot \theta_{Ax} + I_{aa32} \cdot \theta_{Ay} \\
& \quad + I_{aa33} \cdot \theta_{Az}
\end{aligned}$$

Ecuación 87 Sumatoria de momentos de rocker en z.

Como ya se había mencionado anteriormente, los DCL (diagramas de cuerpo libre) de las otras partes del mecánico (bogie y C's) se encuentran en los anexos, así como sus respectivas ecuaciones. Posteriormente se creó el sistema de ecuaciones el cual corresponderá a la forma:

$$A * C = B$$

Ecuación 88 Sistema de ecuaciones de manera matricial.

Donde:

A → Matriz 30x21 ecuaciones obtenidas

$B \rightarrow$ Vector de 21×1 terminos independientes

$C \rightarrow$ Vector de 21×1 variables

Para lo cual podemos despejar el vector de variables, para de esta manera tener la solución para cada una de las incógnitas, por lo que obtendremos:

$$C = A^{-1} * B$$

Ecuación 89 Solución sistema de ecuaciones matricialmente.

Donde:

$A^{-1} \rightarrow$ Matriz inversa de A

Las matrices A, B y C se muestran a continuación de manera general.

$$\begin{aligned}
& a_{RA^*x} * m_{RA} + F_{P1x} \\
& (a_{RA^*y} + g) * m_{RA} + F_{P1y} \\
& a_{RA^*z} * m_{RA} + F_{P1z} \\
& a_{RB^*x} * m_{RB} \\
& (a_{RB^*y} + g) * m_{RB} \\
& a_{RB^*z} * m_{RB} \\
& a_{RC^*x} * m_{RC} \\
& (a_{RC^*y} + g) * m_{RC} \\
& a_{RC^*z} * m_{RC} \\
& a_{RE^*x} * m_{RE} \\
& (a_{RE^*y} + g) * m_{RE} \\
& a_{RE^*z} * m_{RE} \\
& a_{RG^*x} * m_{RG} \\
& (a_{RG^*y} + g) * m_{RG} \\
& a_{RG^*z} * m_{RG} \\
B = & \left\{ \begin{array}{l} \omega_x^{RA} * (I_{RA(3,1)} * \omega_x^{RA} + I_{RA(3,2)} * \omega_y^{RA} + I_{RA(3,3)} * \omega_z^{RA}) - \omega_x^{RA} * (I_{RA(2,1)} * \omega_x^{RA} + I_{RA(2,2)} * \omega_y^{RA} + I_{RA(2,3)} * \omega_z^{RA}) + I_{RA(1,1)} * \alpha_x^{RA} + I_{RA(1,2)} * \alpha_y^{RA} + I_{RA(1,3)} * \alpha_z^{RA} - r_{RA^*P1x} * F_{P1x} + r_{RA^*P1y} * F_{P1y} \\ \omega_x^{RA} * (I_{RA(1,1)} * \omega_x^{RA} + I_{RA(1,2)} * \omega_y^{RA} + I_{RA(1,3)} * \omega_z^{RA}) - \omega_x^{RA} * (I_{RA(3,1)} * \omega_x^{RA} + I_{RA(3,2)} * \omega_y^{RA} + I_{RA(3,3)} * \omega_z^{RA}) + I_{RA(2,1)} * \alpha_x^{RA} + I_{RA(2,2)} * \alpha_y^{RA} + I_{RA(2,3)} * \alpha_z^{RA} - r_{RA^*P1z} * F_{P1z} + r_{RA^*P1x} * F_{P1x} \\ \omega_x^{RA} * (I_{RA(2,1)} * \omega_x^{RA} + I_{RA(2,2)} * \omega_y^{RA} + I_{RA(2,3)} * \omega_z^{RA}) - \omega_y^{RA} * (I_{RA(1,1)} * \omega_x^{RA} + I_{RA(1,2)} * \omega_y^{RA} + I_{RA(1,3)} * \omega_z^{RA}) + I_{RA(3,1)} * \alpha_x^{RA} + I_{RA(3,2)} * \alpha_y^{RA} + I_{RA(3,3)} * \alpha_z^{RA} - r_{RA^*P1y} * F_{P1y} + r_{RA^*P1z} * F_{P1z} \end{array} \right. \\
& \left\{ \begin{array}{l} \omega_x^{RB} * (I_{RB(3,1)} * \omega_x^{RB} + I_{RB(3,2)} * \omega_y^{RB} + I_{RB(3,3)} * \omega_z^{RB}) - \omega_x^{RB} * (I_{RB(2,1)} * \omega_x^{RB} + I_{RB(2,2)} * \omega_y^{RB} + I_{RB(2,3)} * \omega_z^{RB}) + I_{RB(1,1)} * \alpha_x^{RB} + I_{RB(1,2)} * \alpha_y^{RB} + I_{RB(1,3)} * \alpha_z^{RB} \\ \omega_x^{RB} * (I_{RB(1,1)} * \omega_x^{RB} + I_{RB(1,2)} * \omega_y^{RB} + I_{RB(1,3)} * \omega_z^{RB}) - \omega_x^{RB} * (I_{RB(3,1)} * \omega_x^{RB} + I_{RB(3,2)} * \omega_y^{RB} + I_{RB(3,3)} * \omega_z^{RB}) + I_{RB(2,1)} * \alpha_x^{RB} + I_{RB(2,2)} * \alpha_y^{RB} + I_{RB(2,3)} * \alpha_z^{RB} \\ \omega_x^{RB} * (I_{RB(2,1)} * \omega_x^{RB} + I_{RB(2,2)} * \omega_y^{RB} + I_{RB(2,3)} * \omega_z^{RB}) - \omega_y^{RB} * (I_{RB(1,1)} * \omega_x^{RB} + I_{RB(1,2)} * \omega_y^{RB} + I_{RB(1,3)} * \omega_z^{RB}) + I_{RB(3,1)} * \alpha_x^{RB} + I_{RB(3,2)} * \alpha_y^{RB} + I_{RB(3,3)} * \alpha_z^{RB} \\ \omega_x^{RC} * (I_{RC(3,1)} * \omega_x^{RC} + I_{RC(3,2)} * \omega_y^{RC} + I_{RC(3,3)} * \omega_z^{RC}) - \omega_x^{RC} * (I_{RC(2,1)} * \omega_x^{RC} + I_{RC(2,2)} * \omega_y^{RC} + I_{RC(2,3)} * \omega_z^{RC}) + I_{RC(1,1)} * \alpha_x^{RC} + I_{RC(1,2)} * \alpha_y^{RC} + I_{RC(1,3)} * \alpha_z^{RC} \\ \omega_x^{RC} * (I_{RC(1,1)} * \omega_x^{RC} + I_{RC(1,2)} * \omega_y^{RC} + I_{RC(1,3)} * \omega_z^{RC}) - \omega_x^{RC} * (I_{RC(3,1)} * \omega_x^{RC} + I_{RC(3,2)} * \omega_y^{RC} + I_{RC(3,3)} * \omega_z^{RC}) + I_{RC(2,1)} * \alpha_x^{RC} + I_{RC(2,2)} * \alpha_y^{RC} + I_{RC(2,3)} * \alpha_z^{RC} \\ \omega_x^{RC} * (I_{RC(2,1)} * \omega_x^{RC} + I_{RC(2,2)} * \omega_y^{RC} + I_{RC(2,3)} * \omega_z^{RC}) - \omega_y^{RC} * (I_{RC(1,1)} * \omega_x^{RC} + I_{RC(1,2)} * \omega_y^{RC} + I_{RC(1,3)} * \omega_z^{RC}) + I_{RC(3,1)} * \alpha_x^{RC} + I_{RC(3,2)} * \alpha_y^{RC} + I_{RC(3,3)} * \alpha_z^{RC} \\ \omega_x^{RE} * (I_{RE(3,1)} * \omega_x^{RE} + I_{RE(3,2)} * \omega_y^{RE} + I_{RE(3,3)} * \omega_z^{RE}) - \omega_x^{RE} * (I_{RE(2,1)} * \omega_x^{RE} + I_{RE(2,2)} * \omega_y^{RE} + I_{RE(2,3)} * \omega_z^{RE}) + I_{RE(1,1)} * \alpha_x^{RE} + I_{RE(1,2)} * \alpha_y^{RE} + I_{RE(1,3)} * \alpha_z^{RE} \\ \omega_x^{RE} * (I_{RE(1,1)} * \omega_x^{RE} + I_{RE(1,2)} * \omega_y^{RE} + I_{RE(1,3)} * \omega_z^{RE}) - \omega_x^{RE} * (I_{RE(3,1)} * \omega_x^{RE} + I_{RE(3,2)} * \omega_y^{RE} + I_{RE(3,3)} * \omega_z^{RE}) + I_{RE(2,1)} * \alpha_x^{RE} + I_{RE(2,2)} * \alpha_y^{RE} + I_{RE(2,3)} * \alpha_z^{RE} \\ \omega_x^{RE} * (I_{RE(2,1)} * \omega_x^{RE} + I_{RE(2,2)} * \omega_y^{RE} + I_{RE(2,3)} * \omega_z^{RE}) - \omega_y^{RE} * (I_{RE(1,1)} * \omega_x^{RE} + I_{RE(1,2)} * \omega_y^{RE} + I_{RE(1,3)} * \omega_z^{RE}) + I_{RE(3,1)} * \alpha_x^{RE} + I_{RE(3,2)} * \alpha_y^{RE} + I_{RE(3,3)} * \alpha_z^{RE} \\ \omega_x^{RG} * (I_{RG(3,1)} * \omega_x^{RG} + I_{RG(3,2)} * \omega_y^{RG} + I_{RG(3,3)} * \omega_z^{RG}) - \omega_x^{RG} * (I_{RG(2,1)} * \omega_x^{RG} + I_{RG(2,2)} * \omega_y^{RG} + I_{RG(2,3)} * \omega_z^{RG}) + I_{RG(1,1)} * \alpha_x^{RG} + I_{RG(1,2)} * \alpha_y^{RG} + I_{RG(1,3)} * \alpha_z^{RG} \\ \omega_x^{RG} * (I_{RG(1,1)} * \omega_x^{RG} + I_{RG(1,2)} * \omega_y^{RG} + I_{RG(1,3)} * \omega_z^{RG}) - \omega_x^{RG} * (I_{RG(3,1)} * \omega_x^{RG} + I_{RG(3,2)} * \omega_y^{RG} + I_{RG(3,3)} * \omega_z^{RG}) + I_{RG(2,1)} * \alpha_x^{RG} + I_{RG(2,2)} * \alpha_y^{RG} + I_{RG(2,3)} * \alpha_z^{RG} \\ \omega_x^{RG} * (I_{RG(2,1)} * \omega_x^{RG} + I_{RG(2,2)} * \omega_y^{RG} + I_{RG(2,3)} * \omega_z^{RG}) - \omega_y^{RG} * (I_{RG(1,1)} * \omega_x^{RG} + I_{RG(1,2)} * \omega_y^{RG} + I_{RG(1,3)} * \omega_z^{RG}) + I_{RG(3,1)} * \alpha_x^{RG} + I_{RG(3,2)} * \alpha_y^{RG} + I_{RG(3,3)} * \alpha_z^{RG} \end{array} \right. \\
\end{aligned}$$

Ecuación 91 Matriz B.

4.5.2.2. ANÁLISIS INTERACCIÓN LLANTA-SUELO

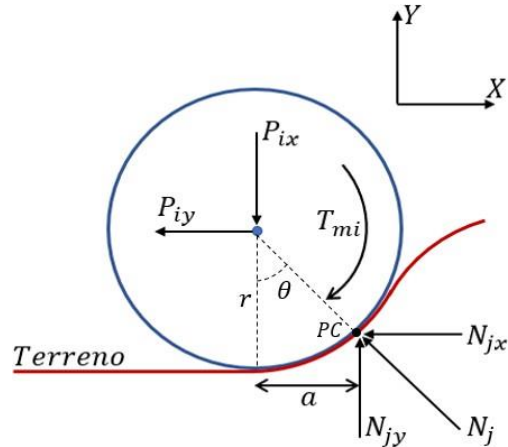


Ilustración 53 Interacción llanta-suelo.

El anterior dibujo es el diagrama para una rueda “x”, es decir, que este análisis es válido para cada una de las ruedas del mecanismo, por tal motivo se debe remplazar la “i” por el valor de la fuerza aplicada en el centro de la llanta, con su respectiva reacción “j”, cada parámetro de la ilustración 47 se muestra a continuación:

P_{ix} & P_{iy} = Fuerzas interna conexión de la llanta con la C

T_{mi} = Torque del motor

r = Radio de la llanta

N_j = Reacción normal del suelo en la llanta

N_{ix} & N_{iy} = Componentes de la reacción normal del suelo

a = Palanca antirrodadura

PC = Punto de contacto

θ = Ángulo entre la vertical y la fuerza N_j

$F_{F_{nec}}$ = Fuerza de fricción necesaria para que no exista deslizamiento

Por la geometría del problema se obtiene que:

$$a = r \cdot \text{sen}(\theta)$$

Ecuación 92 Palanca antirrodadadura.

$$\theta = \text{Sen}^{-1} \left(\frac{a}{r} \right)$$

Ecuación 93 Ángulo entre la vertical y la fuerza N_j .

Se realiza una sumatoria de fuerzas y momentos teniendo en cuenta que este análisis se hace un momento antes del movimiento, es decir, con el sistema en movimiento inminente por lo cual no existe aceleración en los centroides.

$$\sum F_x = 0$$

Ecuación 94 Sumatoria de fuerzas en x igual a cero.

$$-P_{ix} - N_{jx} + F_{Fneq} \cdot \text{Cos}(\theta) = 0$$

Ecuación 95 Resultado de la sumatoria de fuerzas en x.

$$\sum F_y = 0$$

Ecuación 96 Sumatoria de fuerzas en y igual a cero.

$$-P_{iy} + N_{jy} + F_{Fneq} \cdot \text{Sen}(\theta) = 0$$

Ecuación 97 Resultado de la sumatoria de fuerzas en y.

$$\sum M_{Pi} = 0$$

Ecuación 98 Sumatoria de momentos igual a cero.

$$r \cdot \text{Sen}(\theta) \cdot F_{iy} + r \cdot \text{Cos}(\theta) \cdot F_{ix} - T_{mi} = 0$$

Ecuación 99 Resultado de la sumatoria de momentos.

Despejando de la ecuación anterior el torque se obtiene que:

$$T_{mi} = r \cdot \text{Sen}(\theta) \cdot F_{iy} + r \cdot \text{Cos}(\theta) \cdot F_{ix}$$

Ecuación 100 Despeje del torque.

4.5.2.3. SIMULACIÓN SOLIDWORKS

En esta sección se presentan los datos utilizados para la simulación en SolidWorks®, además de los valores obtenidos para posteriormente realizar los cálculos en MATLAB® con las ecuaciones presentadas en la cinemática y en la cinética del vehículo, con el fin de obtener las fuerzas internas del rover y de esta manera realizar los análisis estructurales necesarios.

Para este análisis se simuló un terreno con los siguientes ángulos de pendiente:

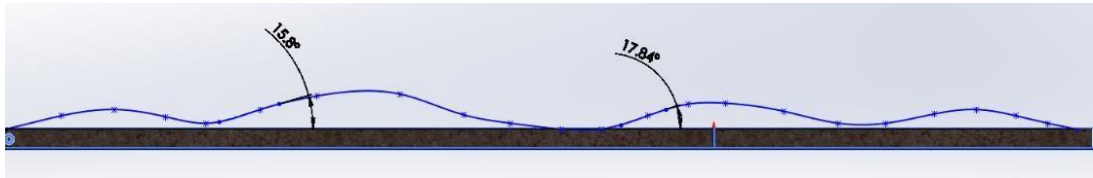


Ilustración 54 Ángulos terreno simulación

Es importante aclarar en este punto que el objetivo del proyecto se limita a pendientes de 5°, sin embargo, el terreno simulado presenta pendientes mayores con el fin de asemejarse al terreno real, además de generar un factor de seguridad alto para la selección de los motores, en esta simulación se toman una carga de 116.7 N que equivalen a 11.9 Kg y debido a que se está simulando la mitad del mecanismo total, se trabajó con los valores anteriormente mencionados.

La respectiva simulación tenía en cuenta el terreno anteriormente ilustrado, con una velocidad de 100 RPM de cada uno de los motores, la gravedad, el contacto entre el terreno y el rover, (teniendo en cuenta el aspecto del coeficiente de restitución igual a 0), y las fuerzas simuladas del peso que ejerce la placa y la carga sobre el mecanismo Rocker-bogie.

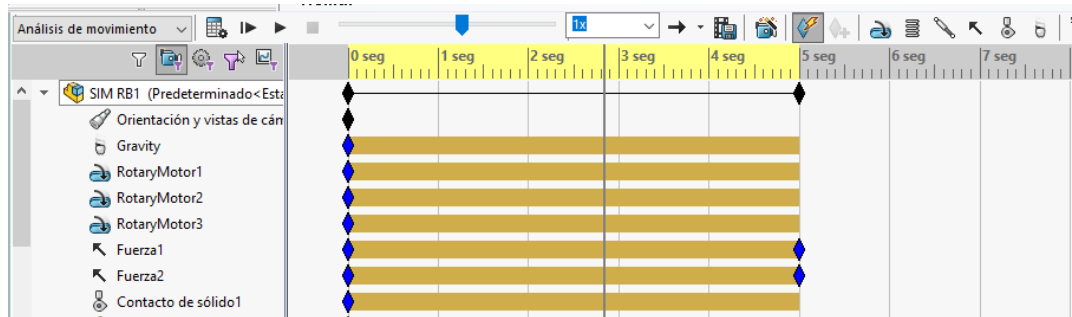


Ilustración 55 Parámetros simulación.

Realizada la simulación como se mostrará en la siguiente imagen, se obtuvieron los resultados con respecto a la posición, velocidad y aceleración, (los cuales serán presentados siguiente a la ilustración de la simulación), que el programa calculó con respecto al punto P1, además de la posición, velocidad y aceleraciones angulares de los cuerpos que conforman el mecanismo los cuales se tienen como valores de entrada para el modelo realizado.

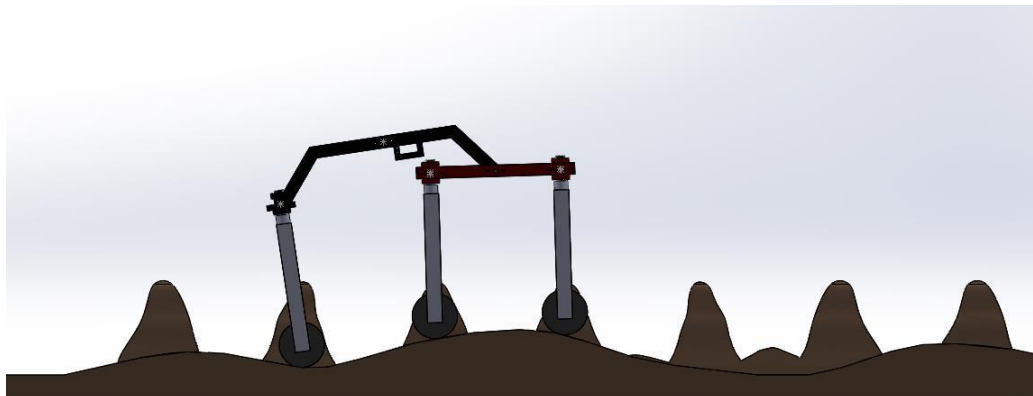


Ilustración 56 Simulación SolidWorks.

Los resultados de la simulación son los siguientes:



Ilustración 57 Gráfica de posición de P1 en simulación

En la presente gráfica se puede evidenciar el comportamiento de las distancias en los distintos ejes, a lo cual en el eje x se ve el mayor cambio, ya que en este eje se desplazó el rover. Por otra parte, se evidencia un cambio en el eje y, ya que el rover atravesó un terreno irregular, a lo cual se presentaron esos cambios en lo que a distancia se refiere. Finalmente, se puede apreciar que no hay cambios en la distancia en el eje z, ya que el rover se trasladó solo en el plano xy.

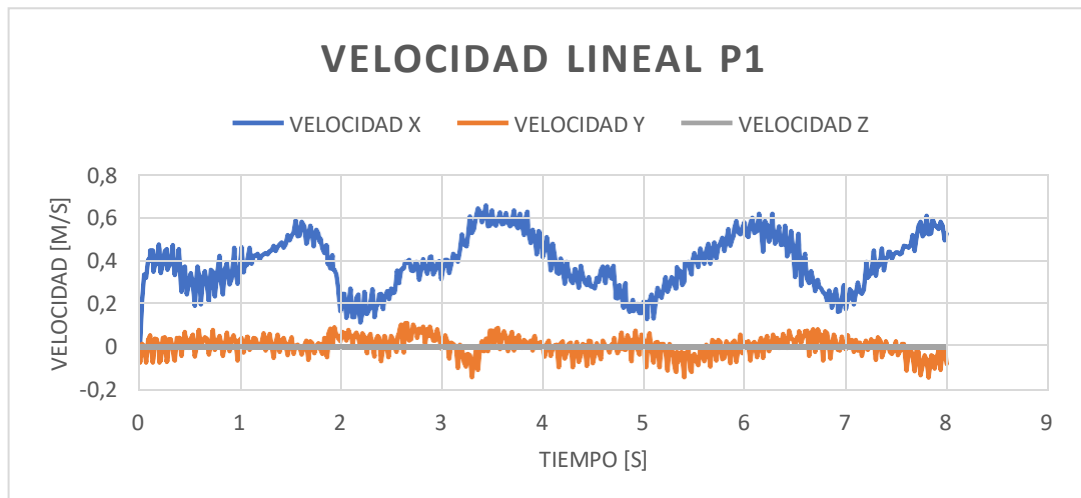


Ilustración 58 Gráfica de velocidad lineal de P1 en simulación

Con respecto a esta gráfica, se puede evidenciar el cambio en el eje x, ya que como el vehículo se encontraba subiendo y bajando pendientes. De esta forma variaría la velocidad, por la parte del eje y, se evidencian pocas variaciones, ya que se está evaluando P1.

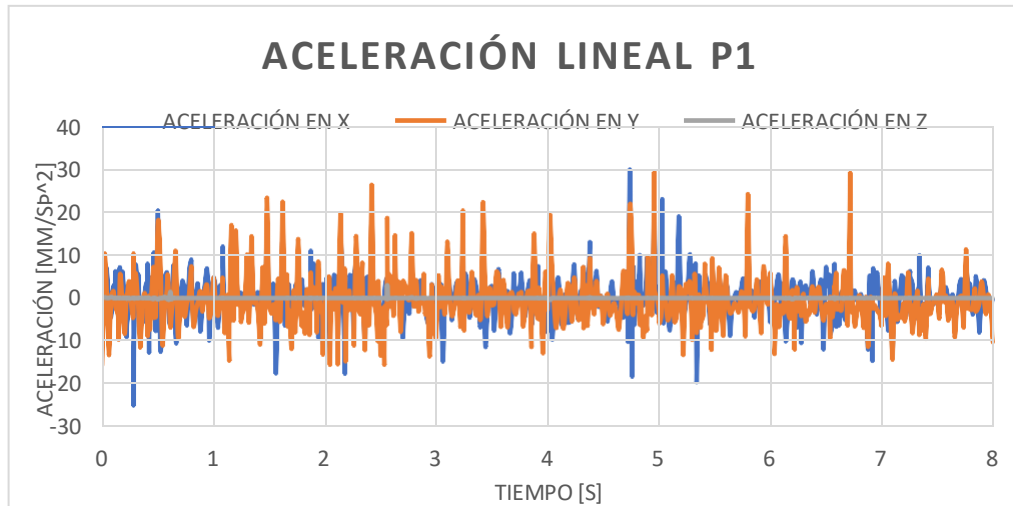


Ilustración 59 Gráfica de aceleración de P1 en simulación

En esta gráfica se evidencian los cambios que se generaron en las direcciones x y y con respecto a la aceleración angular, como también se puede observar que en la dirección z no se presenta ningún cambio, ya que no se realiza movimiento en esa dirección.



Ilustración 60 Gráfica de posición angular de rocker

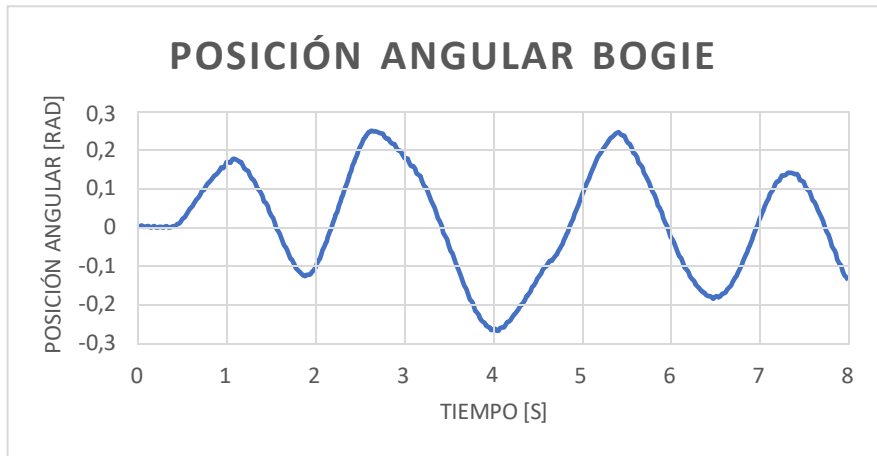


Ilustración 61 Gráfica de posición angular de bogie.

En las presentes gráficas se observa el cambio en posición angular que realizó el rocker y el bogie en el terreno planteado, estos comportamientos con base a las pendientes que tuvo que atravesar. Cabe aclarar que las gráficas de posición, velocidad y aceleración angulares, están en el eje z, ya que como se presenta en las gráficas anteriores, el cambio se realiza en el plano xy, y los cambios angulares se evidenciarán en el eje z.

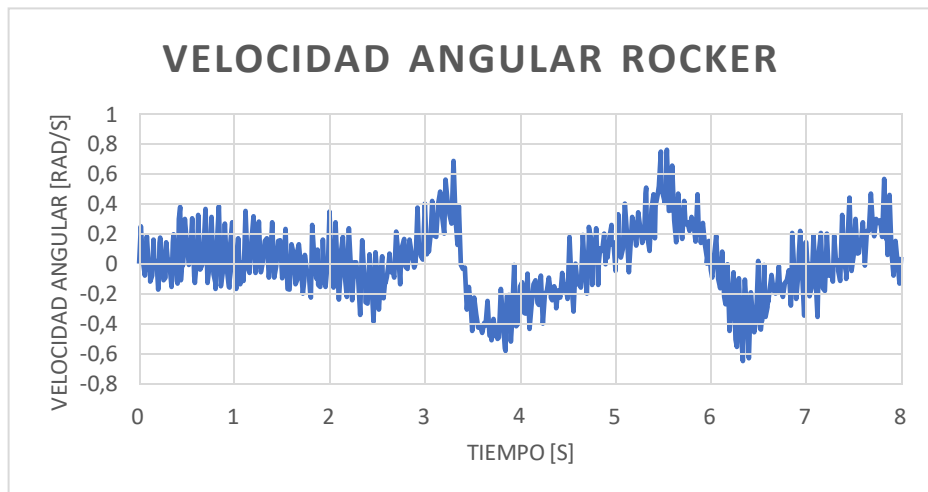


Ilustración 62 Gráfica de velocidad angular de rocker.

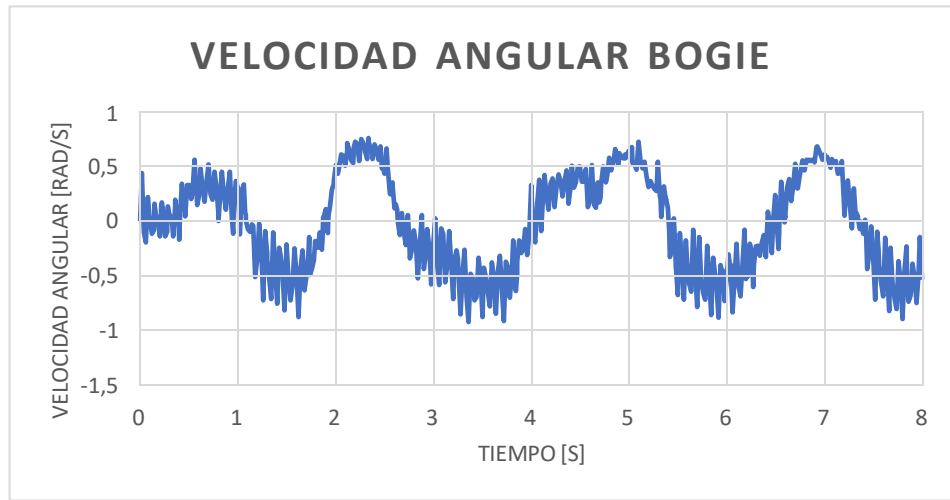


Ilustración 63 Gráfica de velocidad angular de bogie.

Las anteriores gráficas presentan el comportamiento de la velocidad angular, tanto del rocker como del bogie, cabe aclarar que estas velocidades están dadas en la dirección z del eje, estos cambios también son producto del terreno en el que se simuló el rover.

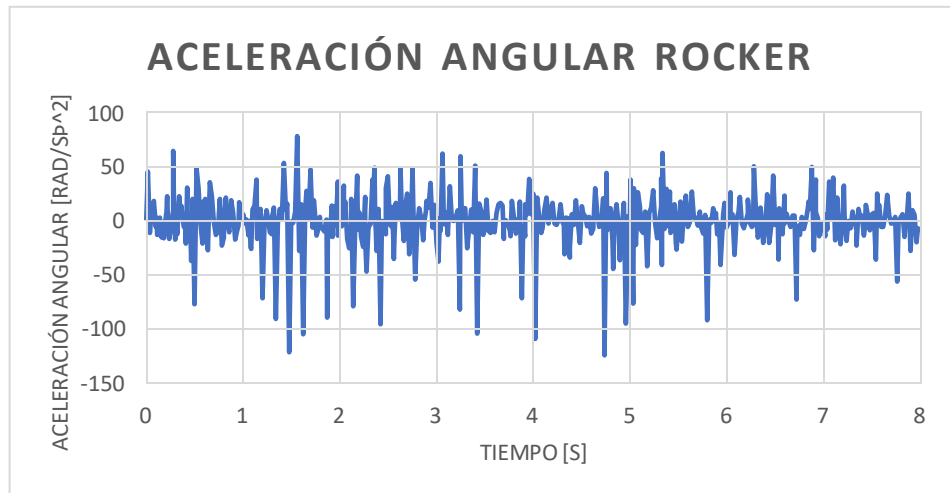


Ilustración 64 Gráfica de aceleración angular de rocker.

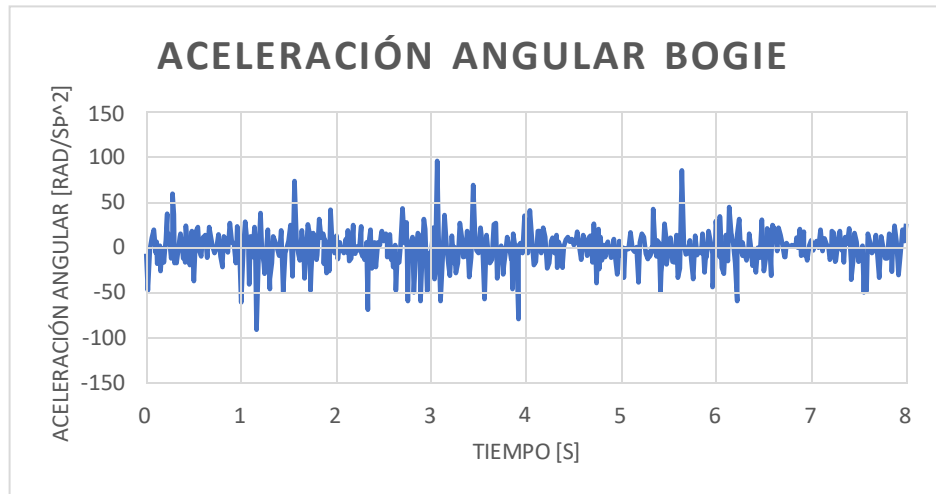


Ilustración 65 Gráfica de aceleración angular de bogie.

Finalmente como se puede observar en las ilustraciones anteriores las aceleraciones angulares del rocker y del bogie son bruscas y esto es debido al terreno irregular simulado, puesto que en ambos casos (rocker y bogie) dependen de la posición de las llantas en el terreno, y si el cambio es inverso, es decir una llanta sube y la otra baja, tendremos un cambio de velocidad brusco como se pudo observar en las gráficas de velocidad angular, por tal motivo la aceleración debe aumentar y disminuir para satisfacer los cambios de la velocidad angular y esto hace que las aceleraciones oscilen con respecto al cero.

4.5.2.4. CODIGO MATLAB

Teniendo claro el procedimiento realizado para la obtención tanto de las ecuaciones como de los datos de entrada del modelo se desarrolló un código, el cual contendrá cada una de las ecuaciones planteadas. Para dicho desarrollo se utilizó el software de MATLAB®, debido a que este software es proporcionado por la universidad.

A continuación, se mostrarán fragmentos del código para describir el procedimiento:

- Leer datos de la simulación de SOLIDWORKS:

```

% t      Variable para tiempo
long_t = length(t);
% px     %Variable para posición en "X" del punto P0
% py     %Variable para posición en "Y" del punto P0
% pz     %Variable para posición en "Z" del punto P0
% vx     %Variable para velocidad en "X" del punto P0
% vy     %Variable para velocidad en "Y" del punto P0
% vz     %Variable para velocidad en "Z" del punto P0
% ax     %Variable para aceleración en "X" del punto P0
% ay     %Variable para aceleración en "Y" del punto P0
% az     %Variable para aceleración en "Z" del punto P0
% ThetaAz      Variable para posición angular del ROCKER
% ThetaAPz     Variable para velocidad angular del ROCKER
% ThetaA2Pz    Variable para aceleración angular del ROCKER
% ThetaBz      Variable para posición angular del BOGIE
% ThetaBPz     Variable para velocidad angular del BOGIE
% ThetaB2Pz    Variable para aceleración angular del BOGIE
OP = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),zeros(long_t,1)]; %Variable para posición angular de la placa
OA = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),ThetaAz]; %Variable para posición angular del ROCKER
OpA = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),ThetaAPz]; %Variable para velocidad angular del ROCKER
O2pA = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),ThetaA2Pz]; %Variable para aceleración angular del ROCKER
OB = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),ThetaBz]; %Variable para posición angular del BOGIE
OpB = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),ThetaBPz]; %Variable para velocidad angular del BOGIE

```

Ilustración 66 Lectura inicial de los datos en MATLAB.

Inicialmente se obtienen los datos de la simulación del programa de SolidWorks y se guardan en un archivo de Excel posteriormente se cargan los datos a Matlab, mediante la herramienta "Import Data" ubicada en el menú "Home" de Matlab, para el correcto funcionamiento del código se deben utilizar los datos en formato de vectores y los mismos nombres dados en los comentarios del código.

En este caso cuando se muestra la línea de código para hallar "long_t", se está leyendo la longitud del vector de tiempo nombrado en el programa como "t", luego se leen crean los vectores correspondientes con los datos para las posiciones, velocidades y aceleraciones angulares de los cuerpos (Rocker y Bogie).

- Parámetros del Vehículo:

```

% PARAMETROS DEL VEHICULO
% En este apartado se encuentran los parametros de distancias establecidos anteriormente en el diseño del mismo.
lp = 0.4;           %Longitud de la placa
lr = 0.47;         %Longitud del rocker
lsr = 0.325;      %Longitud superior del rocker
lb = 0.3;         %Longitud del bogie
lrb = 0.06;       %Longitud entre el centro del rocker y del bogie
h = 0.15;         %Altura del rocker
hc = 0.4;         %Altura de las C's
r = 0.065;        %Radio de las llantas
lxA = 0.07504;    %Longitud del centroide del rocker hasta el punto P1 en "X"
lyA = 0.05688;    %Longitud del centroide del rocker hasta el punto P1 en "Y"
lzA = 0.0082;    %Longitud del centroide del rocker hasta el punto P1 en "Z"
lxB = 0;          %Longitud del centroide del bogie hasta el punto P2 en "X"
lyB = 0;          %Longitud del centroide del bogie hasta el punto P2 en "Y"

```

Ilustración 67 Parámetros del vehículo en MATLAB.

En este apartado se encuentran los parámetros geométricos establecidos anteriormente en el diseño, como lo son las distancias entre puntos clave y centroides, distancias de diseño del vehículo, la distancia del centro de la placa al Rocker, a lo largo del Rocker etc. También se encuentran los valores de las distancias a cada centroide, las matrices de inercia y las respectivas masas de cada cuerpo.

- Ángulos absolutos y relativos:

```

% DATOS DESCRIPCION DEL MOVIMIENTO
O1(i) = OA(i,3) - OP(i,3);      %Desde P hasta A
O2(i) = OB(i,3) - OA(i,3);      %Desde A hasta B
O3(i) = OB(i,2) - OC(i,2);      %Desde B hasta C
O4(i) = OB(i,2) - OE(i,2);      %Desde B hasta E
O5(i) = OA(i,2) - OG(i,2);      %Desde A hasta G
% COSENOS DE LOS ANGULOS ANTERIORES
C1 = cos(O1(i));
C2 = cos(O2(i));
C3 = cos(O3(i));
C4 = cos(O4(i));
C5 = cos(O5(i));
% SENOS DE LOS ANGULOS ANTERIORES
S1 = sin(O1(i));
S2 = sin(O2(i));
S3 = sin(O3(i));
S4 = sin(O4(i));
S5 = sin(O5(i));

```

Ilustración 68 Ángulos absolutos y relativos en MATLAB.

Con los datos leídos en el inicio para los ángulos, se hallan los ángulos relativos para cada cuerpo, para posteriormente usar en las matrices de rotación. Aquí es donde se encuentra el bucle, recorriendo cada uno de los datos obtenidos del análisis de SolidWorks en el tiempo, de ahí, que las demás secciones también estarán dentro de dicho bucle hasta llegar a los resultados.

- Matrices de rotación

```

% MATRICES DE ROTACIÓN
AcP = [C1 -S1 0;
       S1 C1 0 ;
       0 0 1];
BcA = [C2 -S2 0;
       S2 C2 0;
       0 0 1];
CcB = [C3 0 S3;
       0 1 0 ;
       -S3 0 C3];

```

Ilustración 69 Matrices de rotación en MATLAB.

En esta sección se encuentran las matrices de rotación para hacer la conversión de las coordenadas de un sistema de referencia a otro en el tiempo estas están escritas de esta manera “AcP” lo cual significa que esta es la matriz de conversión del sistema de referencia P al sistema de referencia A.

- Posiciones:

```

% POSICIONES
% PUNTOS CLAVES
% PARA IR AL PUNTO P7
PrP0(i,:) = [px(i) py(i) pz(i)];           %Vector posición de P0 en P
ArP1(i,:) = PrP0(i,:)*AcP + [0 0 lp/2]*AcP; %Vector posición de P1 en A
PrP1(i,:) = ArP1(i,:)*PcA;                 %Vector posición de P1 en P
ArP2(i,:) = ArP1(i,:) + [lr/2 -h lrb];     %Vector posición de P2 en A
PrP2(i,:) = ArP2(i,:)*PcA;                 %Vector posición de P2 en P
BrP2(i,:) = ArP2(i,:)*BcA;                 %Vector posición de P2 en B

```

Ilustración 70 Posiciones de los puntos en MATLAB.

Basados en los cálculos realizados en el modelo de Newton-Euler se escriben las ecuaciones para cada una de las posiciones, esto también tiene

en cuenta las matrices de rotación para convertir a otros sistemas de referencia la información que se tiene de cada punto partiendo desde el punto P0 (posición conocida). Siendo “PrP0” la posición del punto P0 en el sistema de referencia P.

- Velocidades:

```
% VELOCIDADES
FvP0(i,:) = [vx(i) vy(i) vz(i)]; %Vector de velocidad del punto P0 en P
AvP1(i,:) = FvP0(i,:)*AcP; %Vector de velocidad del punto P1 en A
AvP2(i,:) = AvP1(i,:) + [h 1r/2 0]*OpA(i,3); %Vector de velocidad del punto P2 en A
BvP2(i,:) = AvP2(i,:)*AcB; %Vector de velocidad del punto P2 en B
BvP3(i,:) = BvP2(i,:) + [0 -1b/2 0]*OpB(i,3); %Vector de velocidad del punto P3 en B
BvP4(i,:) = BvP2(i,:) + [0 1b/2 0]*OpB(i,3); %Vector de velocidad del punto P4 en B
AvP5(i,:) = AvP2(i,:) + [h -1r/2 0]*OpA(i,3); %Vector de velocidad del punto P5 en A
```

Ilustración 71 Velocidades de los puntos en MATLAB.

También partiendo del modelo de Newton-Euler, se escriben las ecuaciones para las velocidades de cada punto de interés, partiendo desde la velocidad del punto P0 (velocidad conocida). Siendo “PvP0” la velocidad del punto P0 en el sistema de referencia P.

- Aceleraciones:

```
% ACELERACIONES
FaP0(i,:) = [ax(i) ay(i) az(i)]; %Vector de aceleracion del punto P0 en P
FaP1(i,:) = FaP0(i,:); %Vector de aceleracion del punto P1 en P
AaP1(i,:) = FaP1(i,:)*AcP; %Vector de aceleracion del punto P1 en A
AaP2(i,:) = AaP1(i,:) + O2pA(i,3)*[h 1r/2 0] + (OpA(i,3)^2)*[-1r/2 h 0]; %Vector de aceleracion del punto P2 en A
AaP5(i,:) = AaP1(i,:) + O2pA(i,3)*[h -1r/2 0] + (OpA(i,3)^2)*[1r/2 h 0]; %Vector de aceleracion del punto P5 en A
BaP2(i,:) = AaP2(i,:)*AcB; %Vector de aceleracion del punto P2 en B
BaP3(i,:) = BaP2(i,:) + O2pB(i,3)*[0 1b/2 0] + (OpB(i,3)^2)*[1b/2 0 0]; %Vector de aceleracion del punto P3 en B
BaP4(i,:) = BaP2(i,:) + O2pB(i,3)*[0 1b/2 0] + (OpB(i,3)^2)*[-1b/2 0 0]; %Vector de aceleracion del punto P4 en B
```

Ilustración 72 Aceleraciones de los puntos en MATLAB.

Finalmente se escriben las aceleraciones de cada punto, teniendo en cuenta también el modelo desarrollado, partiendo también desde el punto P0 (aceleración conocida). Siendo “PaP0” la aceleración del punto P0 en el sistema de referencia P.

- Creación de variables para el sistema de ecuaciones

```

ArPAP1x = ArPAP1 (i, 1) ;
ArPAP1y = ArPAP1 (i, 2) ;
ArPAP1z = ArPAP1 (i, 3) ;
ArPAP2x = ArPAP2 (i, 1) ;
ArPAP2y = ArPAP2 (i, 2) ;
ArPAP2z = ArPAP2 (i, 3) ;
ArPAP5x = ArPAP5 (i, 1) ;
ArPAP5y = ArPAP5 (i, 2) ;
ArPAP5z = ArPAP5 (i, 3) ;

```

Ilustración 73 Creación de variables de los datos obtenidos en MATLAB.

De las aceleraciones calculadas mostradas anteriormente, se crean variables para cada valor en x, y y z, y por cada cuerpo, esto con el fin de realizar el sistema de ecuaciones A y B para hallar las fuerzas resultantes (incógnitas del modelo Newton – Euler) en un vector C. Este proceso de parametrizar cada dato permitirá que, para cualquier cambio en los datos de entrada, ya sea, de parámetros, posiciones u otros, se tenga rápidamente el nuevo sistema de ecuaciones y se pueda solucionar sin realizar cambios en el código del modelo matemático.

- Sistema de ecuaciones

```

% 1      2      3      4      5      6      7      8      9      10     11     12     13
% Fp2x   Fp2y   Fp2z   Fp3x   Fp3y   Fp3z   Fp4x   Fp4y   Fp4z   Fp5x   Fp5y   Fp5z   Fp6x
A = [1    0    0    0    0    0    0    0    0    1    0    0    0
     0    1    0    0    0    0    0    0    0    0    1    0    0
     0    0    1    0    0    0    0    0    0    0    0    1    0
    -1    0    0    1    0    0    1    0    0    0    0    0    0
     0    -1   0    0    1    0    0    1    0    0    0    0    0
     0    0   -1    0    0    1    0    0    1    0    0    0    0
     0    0    0    -1   0    0    0    0    0    0    0    0    0

```

Ilustración 74 Parte de la matriz A en MATLAB.


```

B = [AaRAx*mRA+FP1x;
     AaRAY*mRA+FP1y+mRA*g;
     AaRAz*mRA+FP1z;
     AaRBx*mRB;
     AaRBy*mRB+mRB*g;
     AaRBz*mRB;
     AaREx*mRE;
     AaREy*mRE+mRE*g;
     AaREz*mRE;
     AaRCx*mRC;
     AaRCy*mRC+mRC*g;
     AaRCz*mRC;
     AaRGx*mRG;

```

Ilustración 75 Parte de la matriz B en MATLAB.

Teniendo en cuenta las variables creadas anteriormente se procede a escribir el sistema de ecuaciones en una matriz como se especifica en las ecuaciones 76 y 77 de este documento, para tal fin se crea la matriz “A” la cual contendrá los parámetros que definen el comportamiento del mecanismo y la matriz “B” que es la matriz de términos independientes.

- Solución del sistema de ecuaciones

```

C = pinv(A)*B;
% CONVERSION DE LOS VALORES EN MATRICES
Fp1x = FP1x;
Fp1y = FP1y;
Fp1z = FP1z;
Fp1(i,:) = [Fp1x Fp1y Fp1z];
Fp2x = C(1);
Fp2y = C(2);
Fp2z = C(3);
Fp2(i,:) = [Fp2x Fp2y Fp2z];

```

Ilustración 76 Solución del sistema de ecuaciones y organización de los datos en MATLAB.

Posteriormente se escribió la línea de código para hallar la matriz “C” la cual es la inversa de la matriz “A” multiplicada por la matriz “B”, el comando en MATLAB para encontrar la inversa de una matriz es “inv(matriz)”, pero en este caso no se pudo utilizar dicho comando debido a que la matriz “A” es de tamaño 30x21 (30 filas y 21 columnas), no es cuadrada, por lo que fue necesario implementar la pseudoinversa comando utilizado “pinv(matriz)”. Los valores obtenidos en C se organizan en variables y se crean sus

respectivos vectores por cada fuerza con los datos en las direcciones x, y y z.

- Cálculos de los torques

```
% CALCULO DE TORQUES
TETHA = ang_brazo_antivoltcadura*(pi()/180);           %Angulo para la obtención del brazo de palanca antivoltcadura
Tm1(i) = (r*(sin(TETHA)*Fp6(i,2) + cos(TETHA)*Fp6(i,1))); %Calculo del torque del motor 1
Tm2(i) = (r*(sin(TETHA)*Fp7(i,2) + cos(TETHA)*Fp7(i,1))); %Calculo del torque del motor 2
Tm3(i) = (r*(sin(TETHA)*Fp8(i,2) + cos(TETHA)*Fp8(i,1))); %Calculo del torque del motor 3
```

Ilustración 77 Cálculo de los torques en MATLAB.

Con el análisis realizado entre la interacción llanta-suelo, se procede a escribir esas ecuaciones en MATLAB y al resolverse, se tiene como resultado los torques que deben actuar en cada una de las llantas.

- Error en las ecuaciones

Como la matriz A no es cuadrada, es importante recalcar que no se podría realizar un sistema de ecuaciones con una única solución (debido a que el rango de la matriz A y el rango de la matriz [A B] no es el mismo, por esta razón, es que se utiliza en MATLAB la herramienta de “pinv” que básicamente completa con ceros para que la matriz sea cuadrada y este proceso se conoce como pseudoinversa. Pero dicho sistema no tendrá una solución única y exacta por lo que las líneas de código siguientes al cálculo de los torques es para hallar los errores que se tengan en dicha solución.

- Valores de fuerzas máximas

```
mag_Fp1(i) = norm(Fp1(i,:));
mag_Fp2(i) = norm(Fp2(i,:));
mag_Fp3(i) = norm(Fp3(i,:));
mag_Fp4(i) = norm(Fp4(i,:));
```

Ilustración 78 Magnitudes de las fuerzas MATLAB.

Inicialmente realizamos el cálculo de la magnitud de las fuerzas calculadas anteriormente esto se hace en cada muestra, para esto utilizamos la función “norm” de Matlab, dicha función toma los valores de las coordenadas “x”, “y” y “z” de cada fuerza y da como resultado la magnitud del vector.

```
[Fp1_Max, Pos_Max_Fp1] = max(mag_Fp1);
[Fp2_Max, Pos_Max_Fp2] = max(mag_Fp2);
[Fp3_Max, Pos_Max_Fp3] = max(mag_Fp3);
[Fp4_Max, Pos_Max_Fp4] = max(mag_Fp4);
```

Ilustración 79 Valores máximos de las fuerzas MATLAB.

Posteriormente, utilizando la herramienta “max” de Matlab, se hallaron los máximos del vector de fuerzas en cada punto, esta función retorna dos valores, el primero es el valor máximo del vector y el segundo es la posición de dicho valor dentro del vector.

```
Fp1_FEA = Fp1(Pos_Max_Fp1, :)
Fp2_FEA = Fp2(Pos_Max_Fp2, :)
Fp3_FEA = Fp3(Pos_Max_Fp3, :)
Fp4_FEA = Fp4(Pos_Max_Fp4, :)
```

Ilustración 80 Fuerzas máximas para el análisis de elementos finitos.

Finalmente, con la posición del valor máximo se crearon nuevas variables, que en este caso contendrán los valores máximos de los vectores de fuerza esto con el fin de utilizar estos valores en el análisis de elementos finitos.

- Graficas

```
% RESULTADOS
% GRAFICAS COMPARATIVAS ENTRE EL TORQUE CALCULADO Y EL OBTENIDO EN SOLIDWORKS
figure(2)
subplot(3,1,1)
plot(t_sim, Tm1, t_sim, TM3)
title(subplot(3,1,1), 'Torque Motor Llanta 1 Calculado vs Simulado - P6')
legend(subplot(3,1,1), {'Torque Calculado', 'Torque Simulado'})
ylabel('Torque (N*m)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
subplot(3,1,2)
plot(t_sim, Tm2, t_sim, TM2)
```

Ilustración 81 Código para graficar los resultados obtenidos en MATLAB.

Finalmente, en el código de MATLAB, se encuentran las líneas de código realizadas para crear las gráficas que evidencien los resultados obtenidos.

4.5.2.5. RESULTADOS SIMULACIÓN

En esta sección se evidenciarán los resultados obtenidos por medio del código realizado en el programa de MATLAB, dicho código con el objetivo de obtener valores de torque para los respectivos motores del rover, además de las fuerzas internas en la estructura del vehículo. Se podrá evidenciar gráficas del comportamiento del torque y de las reacciones que se presentan en el rover, en la situación planteada en la simulación de SolidWorks.

- Simulación de movimiento:

Inicialmente se muestra la simulación de movimiento hecha en Matlab, comprobando de esta manera que el recorrido del mecanismo coincida con los datos tomados de la simulación en SolidWorks.



Ilustración 82 Simulación de movimiento en progreso.

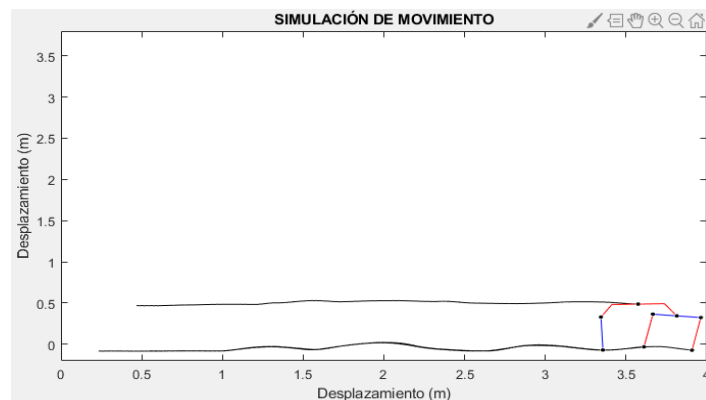


Ilustración 83 Simulación de movimiento finalizada.

En las imágenes anteriores se puede evidenciar la trayectoria de P1, P6, P7 y P8, como se había mencionado anteriormente, los datos del punto P1 fueron sacados de la simulación en SolidWorks para el desarrollo del modelo, nótese que las variaciones de los puntos P6, P7 y P8 son bastante notables a comparación del punto P1, lo cual es la función del Rocker – Bogie, debido a que se adapta al terreno para generar la menor perturbación posible para la placa la cual va sujeta al punto P1.

Luego de aplicar todo el código se corre la parte de los resultados, los cuales muestran las gráficas de fuerzas internas del mecanismo y de torques necesarios aplicados a las ruedas para que el movimiento del mecanismo se realice.

- Torque simulado vs torque calculado

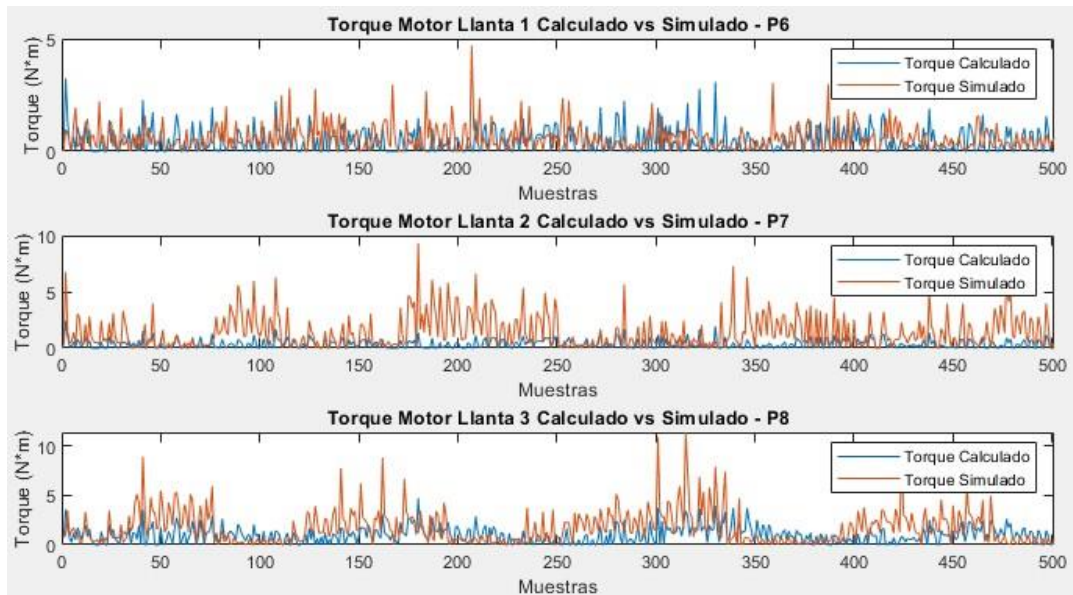


Ilustración 84 Comparativa torques simulado vs calculados.

En la gráfica anterior se puede ver la comparación de los torques necesarios en las llantas calculados por el modelo matemático y los simulados en SolidWorks, donde se puede evidenciar que presentan el mismo comportamiento, pero no la misma amplitud (esto se pudo dar debido a los parámetros del terreno de SolidWorks requeridos para que la simulación funcionara, puesto que con los parámetros del terreno el vehículo se hundía y traspasaba el terreno).

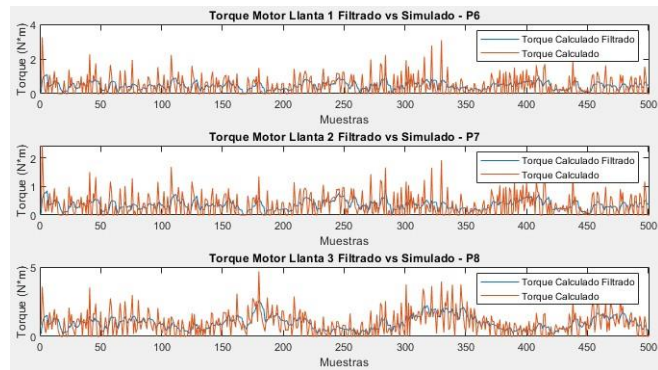


Ilustración 85 Comparativa torque calculado vs filtrado.

En la gráfica anterior se muestra la comparación de los torques en cada instante de tiempo (torques calculados) con los torques que fueron suavizados mediante un promedio de los últimos 5 datos (torques calculados filtrado), cabe aclarar que estos son los calculados con el modelo matemático implementado en Matlab®, cabe resaltar que en el “command window” de Matlab se imprimen los valores máximos encontrados.

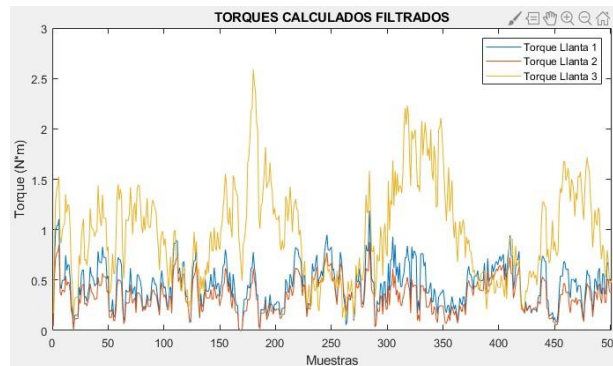


Ilustración 86 Comparativa torques calculado filtrados de cada llanta.

En la anterior grafica se muestra la comparación de los torques calculados con el respectivo suavizado mencionado anteriormente, donde se puede observar que las llantas 1 y 2, P6 y P7 respectivamente las cuales son las llantas del Bogie, presentan un comportamiento similar, en cambio la llanta 3 la cual pertenece al Rocker tiene mayor exigencia por ser un único motor.

En la siguiente grafica se muestra la comparación de los torques obtenidos mediante el programa de simulación SolidWorks® en la cual se nota que la llanta 1 (ubicada en la parte frontal del Bogie) tienen menor exigencia que las otras dos ruedas.

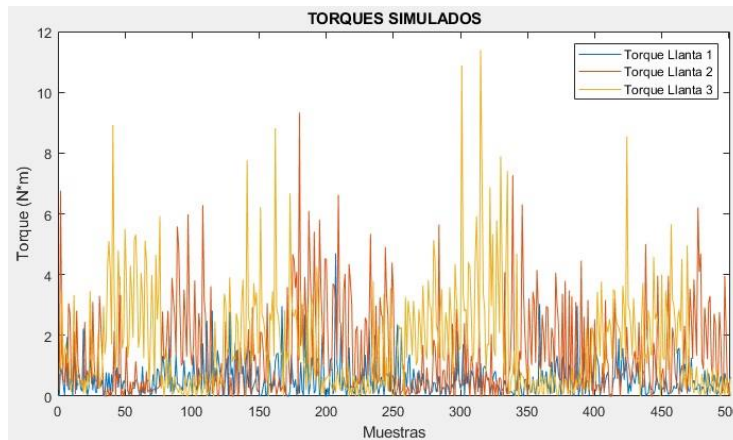


Ilustración 87 Comparativa de torques simulados de cada llanta.

En la siguiente grafica se puede observar la comparación entre los torques calculados por el modelo matemático (sin suavizar) donde se puede observar la mayor exigencia de la llanta 3 (ubicada en la parte posterior del mecanismo) en comparación de las otras dos ruedas.

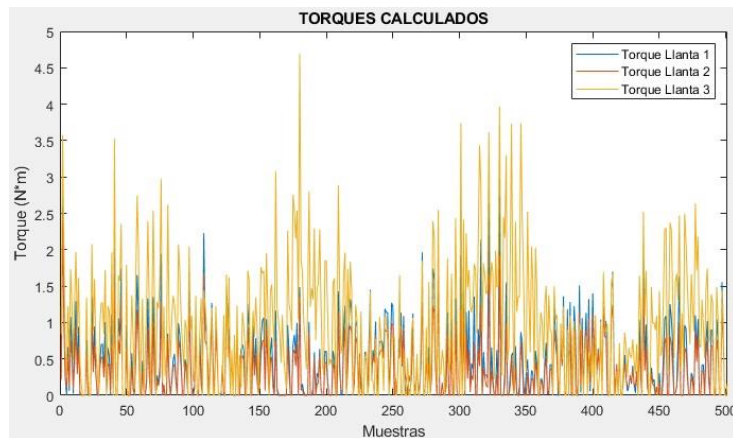


Ilustración 88 Comparativa de torques calculados de cada llanta.

- Reacciones internas resultantes en cada punto clave

En las siguientes graficas se puede observar el comportamiento de las reacciones internas del mecanismo con respecto al tiempo, iniciando con el punto uno (unión placa con mecanismo Rocker-Bogie) hasta llegar al punto ocho (rueda posterior del mecanismo) pasando por el punto dos (unión del Rocker con el Bogie) y demás especificados en los puntos clave en la sección anterior 4.5.1.4 titulada “puntos clave”.

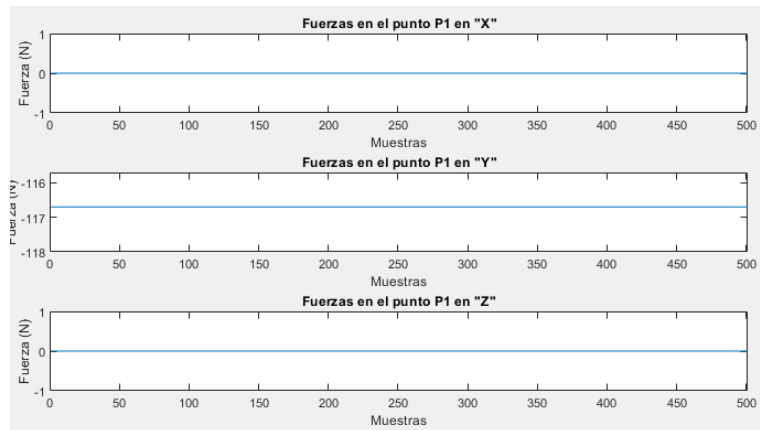


Ilustración 89 Fuerzas en el punto P1.

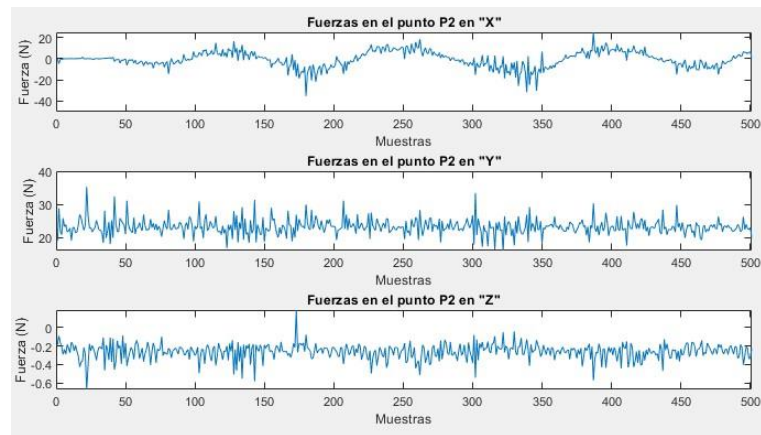


Ilustración 90 Fuerzas en el punto P2.

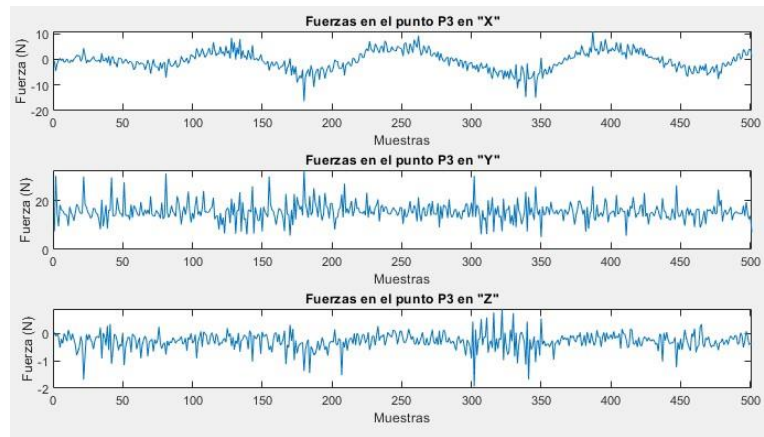


Ilustración 91 Fuerzas en el punto P3.

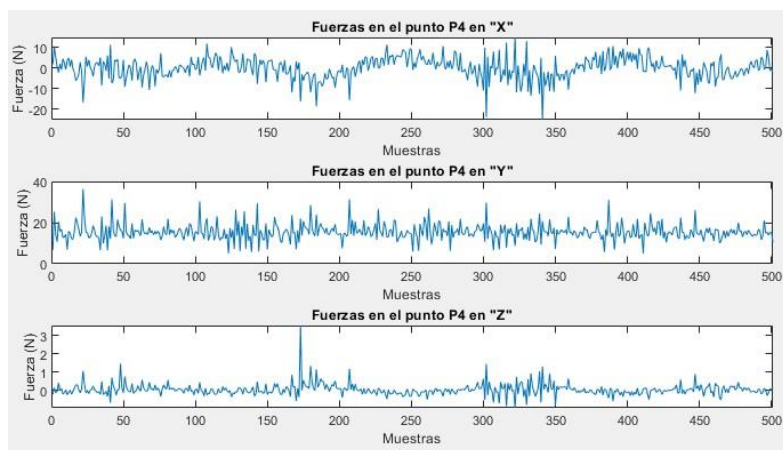


Ilustración 92 Fuerzas en el punto P4.

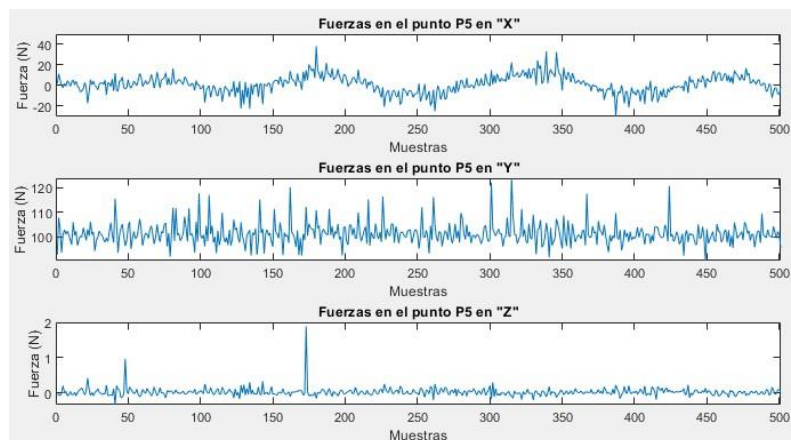


Ilustración 93 Fuerzas en el punto P5.

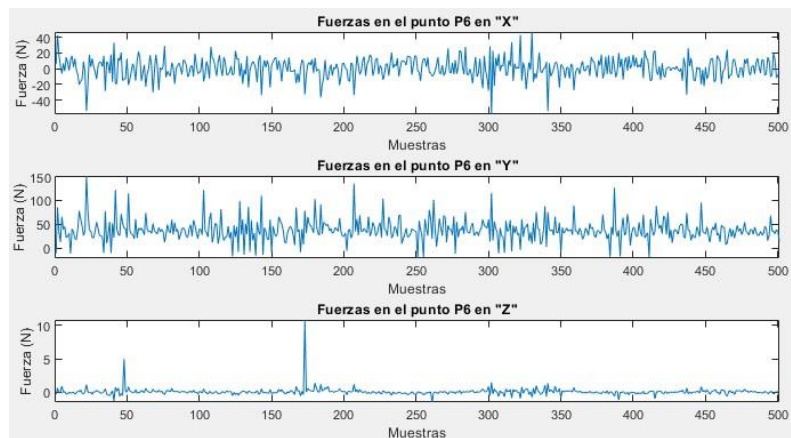


Ilustración 94 Fuerzas en el punto P6.

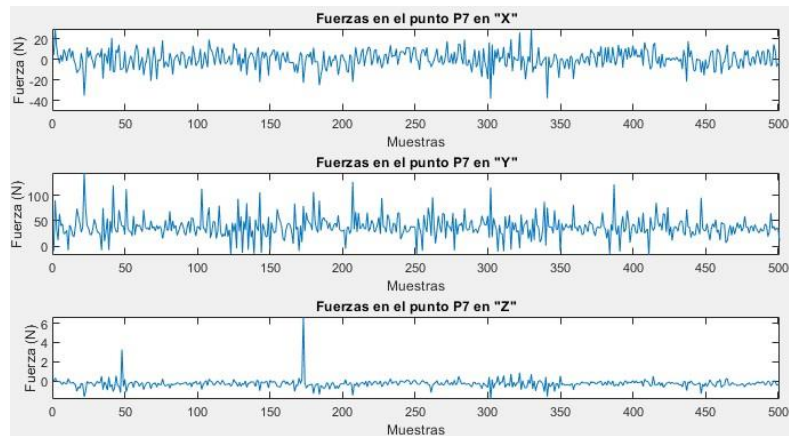


Ilustración 95 Fuerzas en el punto P7.

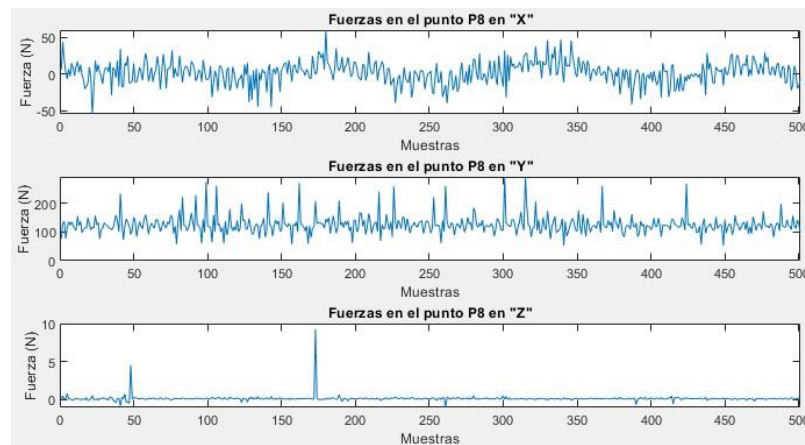


Ilustración 96 Fuerzas en el punto P8.

Como se puede observar en las gráficas anteriores la componente en fuerza en la dirección “z” es casi nula debido a que en este eje la carga inicial es “0 newtons” y va aumentando al realizar la sumatoria de momentos, porque se tuvieron en cuenta todas las direcciones (sin simplificaciones) en el modelamiento matemático del mecanismo.

4.6. ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

Luego de la obtención de los valores de las reacciones se procedió a utilizar la herramienta de elementos finitos del software de SolidWorks® para realizar el análisis de resistencia de materiales, las piezas analizadas fueron

las que conforman el mecanismo, es decir, el rocker, el bogie, y la pieza “C”, dicho análisis se realizó para obtener información de los calibres requeridos para la construcción además de su respectivo factor de seguridad los resultados de cada pieza analizada se encuentran discriminados por secciones como se muestran a continuación.

4.6.1. ANÁLISIS ROCKER

El rocker del vehículo fue la pieza con la que se iniciaron los análisis, como se mencionó en secciones anteriores los puntos clave del mecanismo son donde se conectan cada una de las piezas, en este caso los puntos P1, P2 y P5 son las conexiones del rocker con la placa, el bogie y la “C” respectivamente (para más información sobre el tipo de anclaje del rocker con la respectiva pieza se puede ver la sección 4.3 titulada “elementos de maquina”), en dichos puntos se aplicaron las cargas máximas obtenidas en el modelamiento matemático y al realizar el análisis se obtuvieron los siguientes resultados:

4.6.1.1. VON MISSES

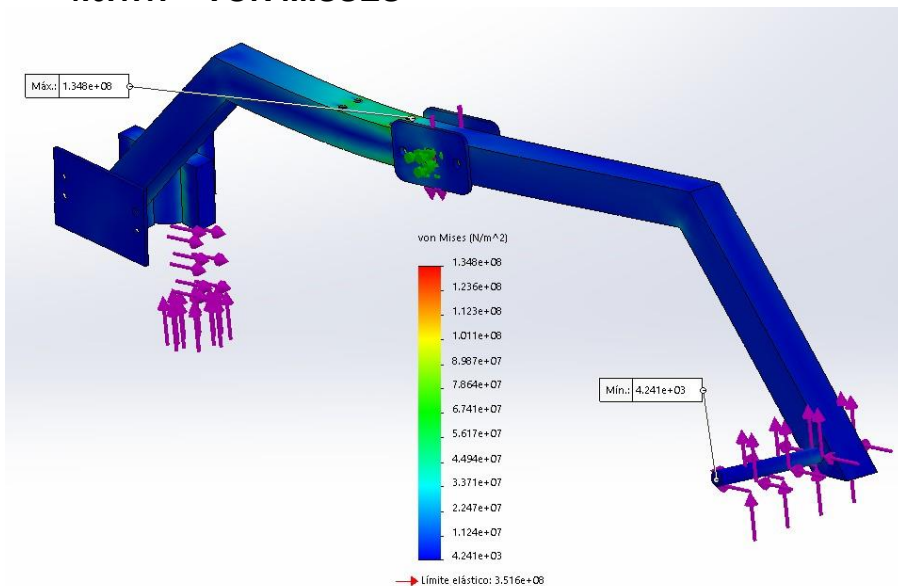


Ilustración 97 Análisis de von misses del rocker.

El análisis de von misses mostrado en la imagen anterior, da a conocer en qué puntos fueron ubicadas las cargas, como se muestra en la imagen anterior máximo se producen deformaciones plásticas que no representan un riesgo para la pieza, por tal motivo demuestra que el material empleado en el análisis es capaz de soportar las cargas máximas simuladas.

4.6.1.2. DESPLAZAMIENTOS

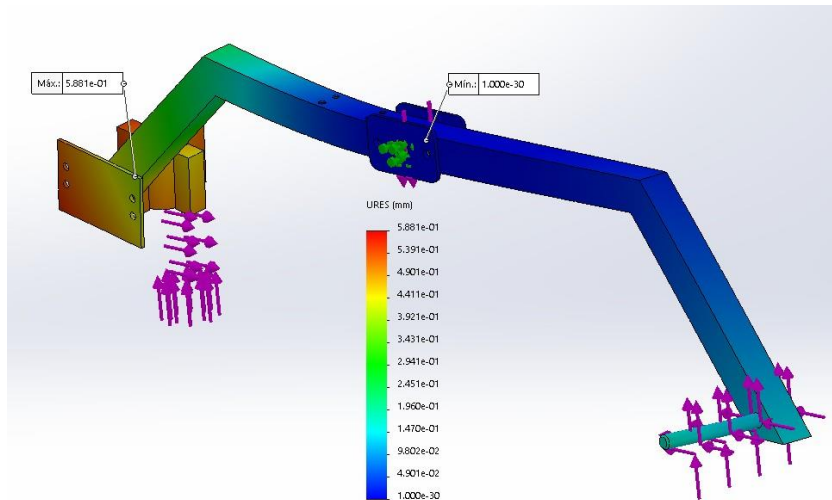


Ilustración 98 Desplazamientos producidos en el rocker.

En la gráfica del análisis de desplazamientos, el máximo valor encontrado es de 0.5881 milímetros dicho análisis se muestra con una escala de deformación de 80 para poder mostrar dónde estaría el desplazamiento producido por las cargas.

4.6.1.3. DEFORMACIÓN UNITARIA

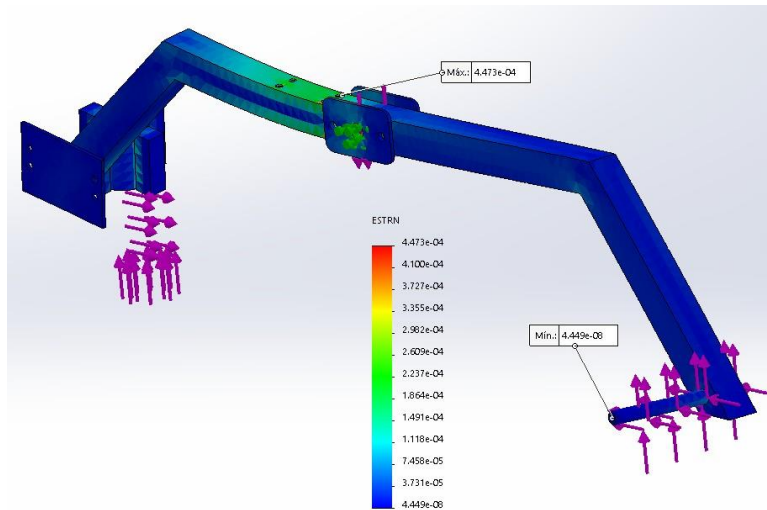


Ilustración 99 Deformaciones unitarias en el rocker.

En esta grafica se muestra que la máxima deformación unitaria es de $4,473 \times 10^{-4}$, es decir, un valor muy cercano cero por lo que se podría demostrar que dichas deformaciones no afectarán en gran manera la pieza diseñada y al igual que la gráfica anterior se tiene una escala de deformación de 80 para mostrar los resultados.

4.6.1.4. FACTOR DE SEGURIDAD

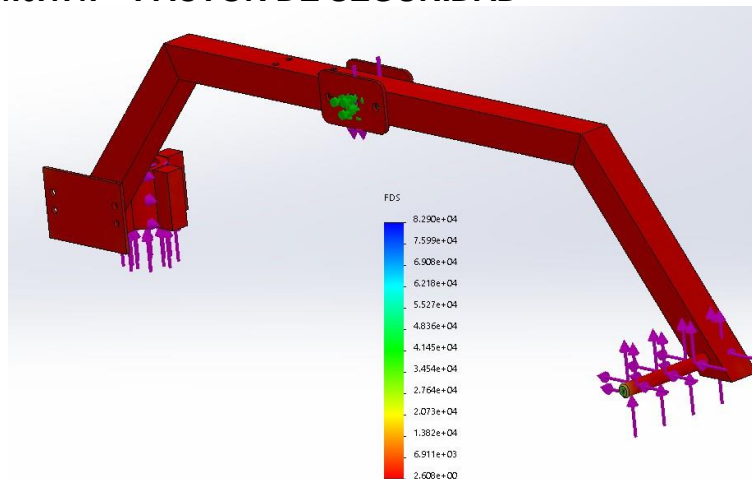


Ilustración 100 Factor de seguridad del rocker.

La presente gráfica, mostrando el factor de seguridad en toda la pieza, se puede ver que el factor de seguridad de esta pieza es de 2.6, siendo este un factor de seguridad que garantice el funcionamiento de esta pieza.

4.6.1.5. RESUMEN DE RESULTADOS ROCKER

Tabla 6 Resumen del resultado F.E.A. para el rocker.

PARTE DEL PROTOTIPO		ROCKER		
TIPO DE ANALISIS	UNIDAD DEL ANALISIS	VALOR MAXIMO	VALOR MINIMO	VALOR DEL MATERIAL
TENSIONES	PASCALES	$1.348 * 10^8$	$4.241 * 10^3$	$3.516 * 10^8$
DESPLAZAMIENTOS	MILIMETROS	0.5881	$1 * 10^{-30}$	NO DETERMINADO
DEFORMACIÓN UNITARIA	SIN UNIDADES	$4.473 * 10^{-4}$	$4.449 * 10^{-8}$	NO DETERMINADO

4.6.2. ANÁLISIS BOGIE

La segunda pieza analizada fue el bogie, como se mencionó en secciones anteriores los puntos clave del mecanismo son donde se conectan cada una de las piezas, en este caso los puntos P2, P3 y P4 son las conexiones del bogie con el rocker y cada una de las "C" respectivamente (para más información sobre el tipo de anclaje del bogie con la respectiva pieza se puede ver la sección 4.3 titulada "elementos de maquina"), en dichos puntos se aplicaron las cargas máximas obtenidas en el modelamiento matemático y al realizar el análisis se obtuvieron los siguientes resultados:

4.6.2.1. VON MISSES

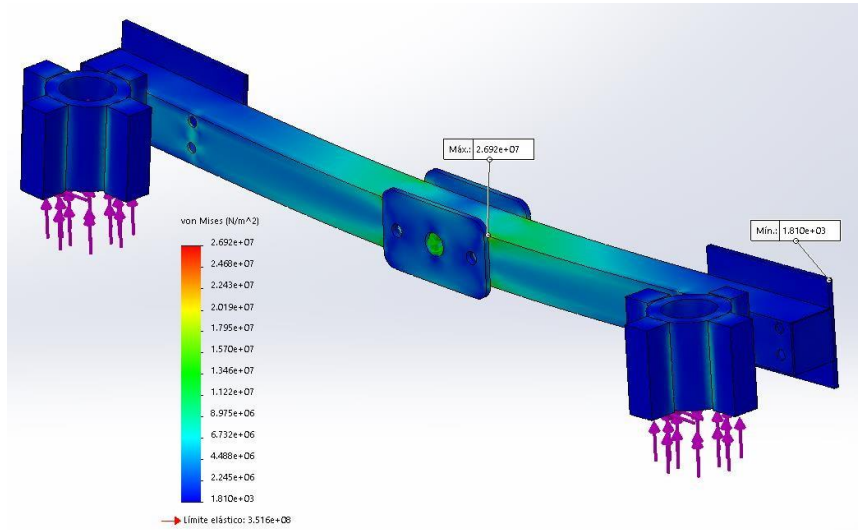


Ilustración 101 Análisis de von misses del bogie.

La grafica del análisis de von misses del bogie muestra un valor máximo de tensión de 2.692×10^7 pascales, por lo que tampoco supera el límite elástico del material utilizado y de esta manera demuestra que soportará la carga simulada. Las imágenes anteriores se muestran con una escala de deformación de 10.000 al graficar el resultado.

4.6.2.2. DESPLAZAMIENTOS

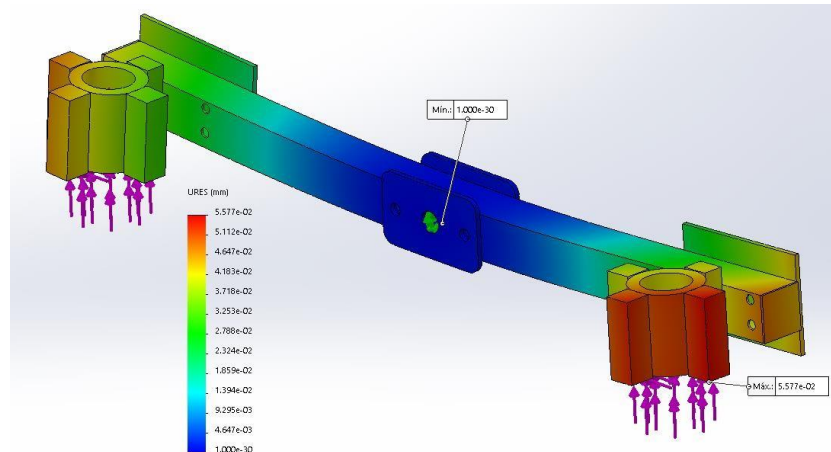


Ilustración 102 Desplazamientos producidos en el bogie.

En la gráfica anterior se muestra que el máximo valor de los desplazamientos producidos en la simulación es $5.577 * 10^{-2}$, dicho valor no representa un riesgo para la pieza diseñada. Dicha grafica también tiene la misma escala de deformación que las anteriores (von misses).

4.6.2.3. DEFORMACIÓN UNITARIA

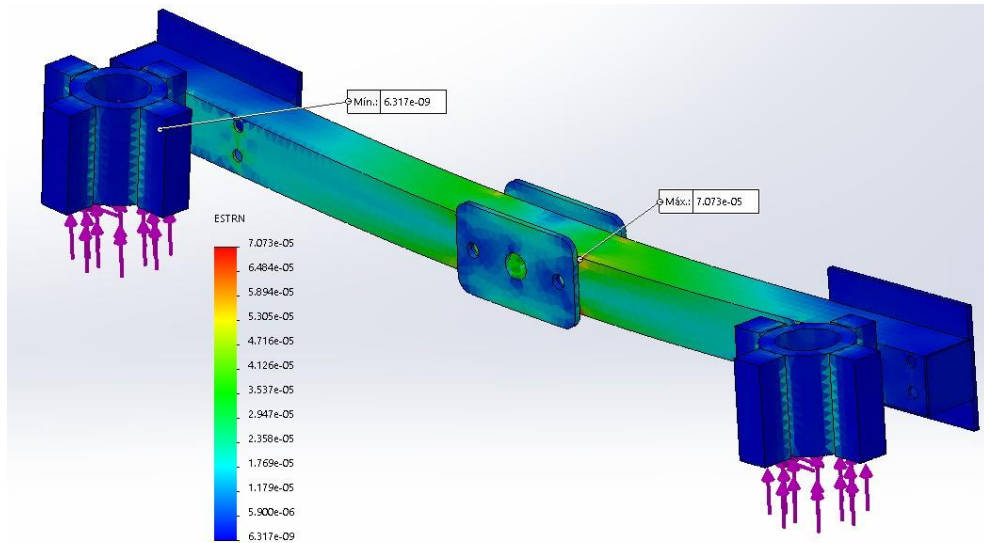


Ilustración 103 Deformaciones unitarias en el bogie.

Siguiente, el máximo de valor encontrado de las deformaciones unitarias es $7.073 * 10^{-5}$ y por lo tanto se demuestra que el material soportará toda la carga con la que se simuló. El valor de la escala de deformación permite mostrar dónde se podría encontrar dicho máximo valor.

4.6.2.4. FACTOR DE SEGURIDAD

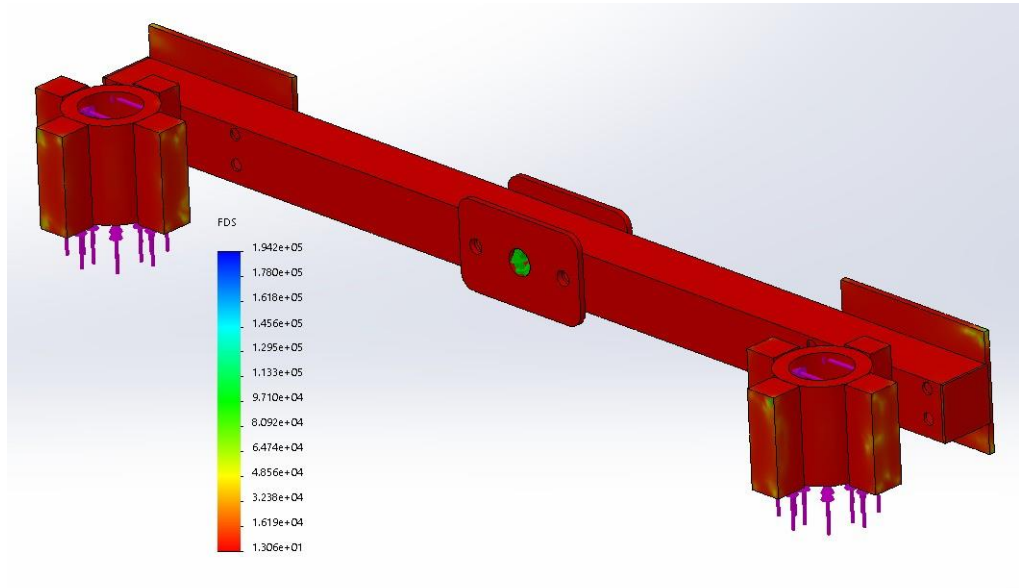


Ilustración 104 Factor de seguridad del bogie.

Finalmente, se presenta la gráfica del factor de seguridad, evidenciándose las zonas las cuales la pieza podría sufrir daños, en las cuales el mínimo factor de seguridad es de 13, asegurando así que la pieza no sufrirá daños severos.

4.6.2.5. RESUMEN DE RESULTADOS DEL BOGIE

Tabla 7 Resumen del resultado F.E.A. para el bogie.

PARTE DEL PROTOTIPO		BOGIE		
TIPO DE ANALISIS	UNIDAD DEL ANALISIS	VALOR MAXIMO	VALOR MINIMO	VALOR DEL MATERIAL
TENSIONES	PASCALES	$2.692 * 10^7$	$1.810 * 10^3$	$3.516 * 10^8$
DESPLAZAMIENTOS	MILIMETROS	0.005577	$1 * 10^{-30}$	NO DETERMINADO
DEFORMACIÓN UNITARIA	SIN UNIDADES	$7.073 * 10^{-5}$	$6.317 * 10^{-9}$	NO DETERMINADO

4.6.3. ANÁLISIS C

La tercera y última pieza analizada fue la “C”, como se mencionó en secciones anteriores los puntos clave del mecanismo son donde se conectan cada una de las piezas, en este caso los puntos P2 o P3 o P5 y P7 o P6 o P8, son las conexiones del rocker y el bogie con cada una de las C’s respectivamente (para más información sobre el tipo de anclaje del bogie con la respectiva pieza se puede ver la sección 4.3 titulada “elementos de maquina”), para este caso la pieza a analizar es una pieza que se repite en el mecanismo, por tal motivo se tomó la carga máxima soportada entre las tres piezas, en este caso son las cargas en los puntos P5 y P8, del análisis se obtuvieron los siguientes resultados:

4.6.3.1. VON MISSES

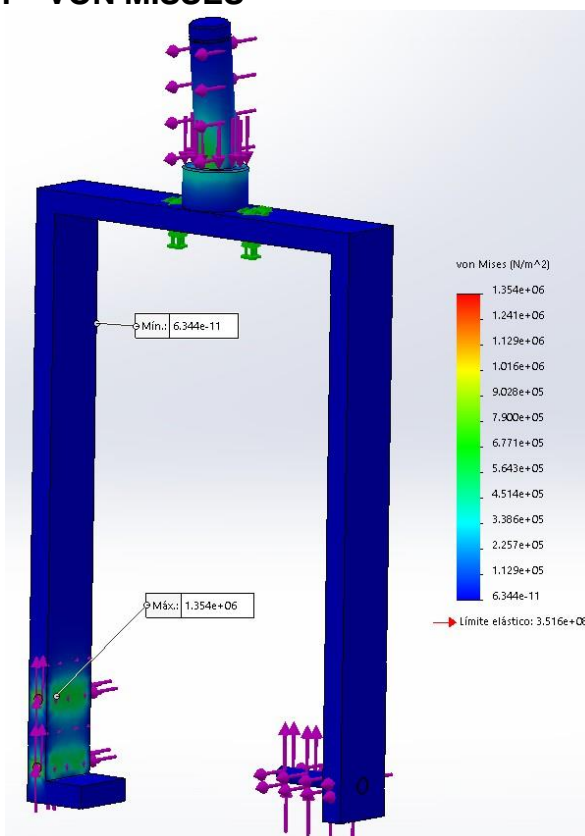


Ilustración 105 Análisis de von misses en la C.

La grafica de las tensiones de von misses muestra que el valor máximo encontrado es de $1.354 * 10^6$ pascales dicho valor no superar el límite elástico del material implementado, por tal motivo las deformaciones para la carga máxima no deformaran plásticamente la pieza. Dicha imagen se muestra con una escala de deformación de 200 para poder evidenciar gráficamente los resultados.

4.6.3.2. DESPLAZAMIENTOS

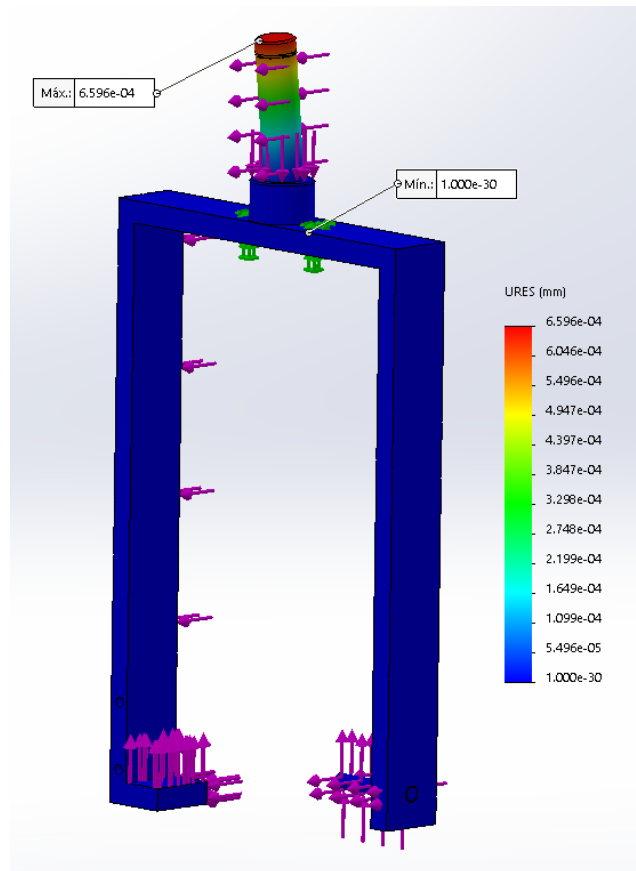


Ilustración 106 Análisis de von misses en la C.

Como se puede observar en la ilustración anterior el máximo valor de desplazamientos es de $6.596 * 10^{-4}$ milímetros por lo que no representa un riesgo para pieza diseñada y demuestra que soportará la carga máxima a la que esta se encuentra expuesta. Este resultado anterior se encuentra en la misma escala de deformación que las tensiones de von misses.

4.6.3.3. DEFORMACIÓN UNITARIA

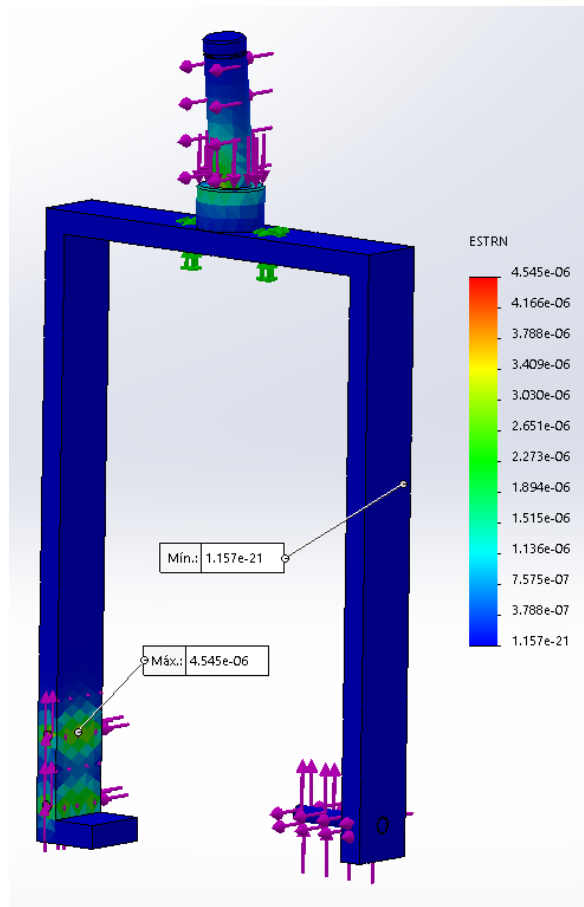


Ilustración 107 Deformaciones unitarias en la C.

Como se puede observar en la imagen anterior las deformaciones unitarias de la pieza “C” de la misma manera que en las piezas anteriores, es decir, el rocker y el bogie, no se encuentra un valor superior a cero de esta manera da la certeza de que el material implementado y la pieza diseñada son viables para la construcción.

4.6.3.4. FACTOR DE SEGURIDAD

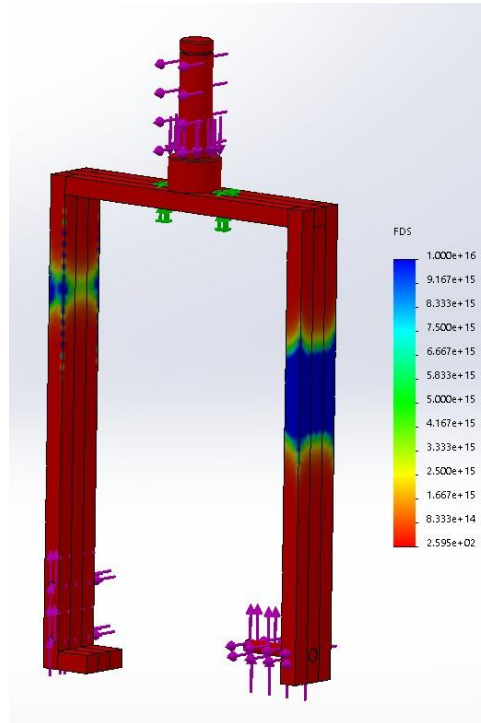


Ilustración 108 Factor de seguridad de la C.

Finalmente, se tiene la gráfica que representa las zonas de factor de seguridad, en las que se puede ver el gran factor de seguridad presentado en esta pieza, como lo es 259, siendo este el menor factor de seguridad en dicha pieza.

4.6.3.5. RESUMEN DE RESULTADOS C

Tabla 8 Resumen del resultado F.E.A. para C's

TIPO DE ANALISIS	UNIDAD DEL ANALISIS	VALOR MAXIMO	VALOR MINIMO	VALOR DEL MATERIAL
TENSIONES	PASCALES	$1.354 * 10^6$	$6.344 * 10^{-11}$	$3.516 * 10^8$
DESPLAZAMIENTOS	MILIMETROS	$6.596 * 10^{-4}$	$1 * 10^{-30}$	NO DETERMINADO
DEFORMACIÓN UNITARIA	SIN UNIDADES	$4.545 * 10^{-6}$	$1.157 * 10^{-21}$	NO DETERMINADO

Debido a que en todos los análisis realizados con las cargas y las fuerzas internas encontradas por el modelamiento matemático no superaron el límite elástico del material, los materiales utilizados en el diseño son adecuados para la carga a soportar, como no supero el límite elástico el vehículo no tendrá deformaciones permanentes, además de esto la mayor deformación es sufrida por el “rocker”, pieza que tuvo la mayor deformación en los análisis por elementos finitos, con tan solo 0.908 mm de deformación total, como ya se había mencionado que el esfuerzo máximo no sobrepasa el límite elástico del material, al momento de retirar la carga las piezas que conforman el mecanismo volverá a la posición original.

4.6.3.6. RESUMEN DE RESULTADOS

En la siguiente tabla se muestran los factores de seguridad mínimo obtenidos mediante el análisis por elementos finitos, como se podrá observar estos factores de seguridad superan el valor de 2, es decir que la pieza crítica del mecanismo es capaz de soportar más del doble de la carga para lo cual está diseñado.

Tabla 9 Factores de seguridad de los cuerpos.

Elemento	Material	Factor de seguridad
Rocker	AISI 1020	2.608
Bogie	AISI 1020	13.06
C	AISI 1020	259.5

4.7. ELECTRÓNICA DEL MECANISMO

En esta sección se encontrará la información relacionada con los actuadores, sensores y el controlador utilizados para el control del mecanismo, así como también sus diagramas de conexión y características técnicas, cabe aclarar que esta información es necesaria para la realización del circuito que ayudara a controlar el mecanismo, así como para la elección del controlador a utilizar porque dependiendo de los actuadores y sensores se buscó el microcontrolador más apropiado para el manejo de los mismos.

4.7.1. ACTUADORES

Inicialmente presentaremos los actuadores que serán cada uno de los motores a implementar para el correcto funcionamiento del vehículo, entre estos están los motorreductores y los servomotores a continuación sus referencias y características.

- **MOTORREDUCTOR PARA TRANSPORTE**



Ilustración 109 Motorreductor 12V.

Tabla 10 Características del motorreductor.

CARACTERÍSTICAS	VALOR	CARACTERÍSTICAS	VALOR
Número de modelo	4632 – 370 / 1019	Relación de piñones	1:1019
Tensión de trabajo	12 V DC	Torque con carga	30 kg*cm
Corriente sin carga	200 mA	Corriente con rotor bloqueado	5.5 A
Velocidad sin carga	12 RPM	Corriente nominal con carga	2.3 A

- **SERVOMOTOR MG995 PARA DIRECCIÓN – 180°**



Ilustración 110 Servomotor de 180°.

Tabla 11 Características servomotor MG995 de 180°.

CARACTERÍSTICAS	VALOR	CARACTERÍSTICAS	VALOR
Voltaje de entrada	4.8 – 7.2 V DC	Tipo de piñonería	Metálica
Corriente nominal	900 mA	Rango de rotación	180°
Velocidad de operación	0.2 seg/60° - 4.8 VDC 0.16 seg/60° - 6.0 VDC	Torque nominal	9.4 kg*cm – 4.8 VDC 11 kg*cm – 6.0 VDC
Conector	JR – 3 pines	Pines	Café – GND Rojo – VCC Amarillo - SEÑAL
Temperatura de trabajo	-30° - 60°		

- **SERVOMOTOR MG995 PARA SIEMBRA – 270°**



Ilustración 111 Servomotor de 270°.

Tabla 12 Características servomotor MG995 de 270°.

CARACTERÍSTICAS	VALOR	CARACTERÍSTICAS	VALOR
Voltaje de entrada	4.8 – 7.2 V DC	Tipo de piñonería	Metálica
Corriente nominal	900 mA	Rango de rotación	270°
Velocidad de operación	0.2 seg/60° - 4.8 VDC 0.16 seg/60° - 6.0 VDC	Torque nominal	9.4 kg*cm – 4.8 VDC 11 kg*cm – 6.0 VDC
Conector	JR – 3 pines	Pines	Café – GND Rojo – VCC Amarillo - SEÑAL
Temperatura de trabajo	-30° - 60°		

- **SERVOMOTOR MG995 PARA RIEGO – 90°**



Ilustración 112 Servomotor de 90° con set de acoples.

Tabla 13 Características servomotor MG995 de 90°.

CARACTERÍSTICAS	VALOR	CARACTERÍSTICAS	VALOR
Voltaje de entrada	4.8 – 7.2 V DC	Tipo de piñonería	Metálica
Corriente nominal	900 mA	Rango de rotación	90°
Velocidad de operación	0.2 seg/60° - 4.8 VDC 0.16 seg/60° - 6.0 VDC	Torque nominal	9.4 kg*cm – 4.8 VDC 11 kg*cm – 6.0 VDC
Conector	JR – 3 pines	Pines	Café – GND Rojo – VCC Amarillo - SEÑAL
Temperatura de trabajo	-30° - 60°		

4.7.2. SENSORES

Posteriormente se mostrará el único sensor utilizado en el mecanismo, porque solamente se requiere obtener la posición de la placa para con este dato realizar el control y de esta manera garantizar que la placa que une a los dos mecanismos permanezca horizontal en todo momento, para esta función se eligió el siguiente sensor:

- **GIROSCOPIO Y ACELEROMETRO MPU6050**

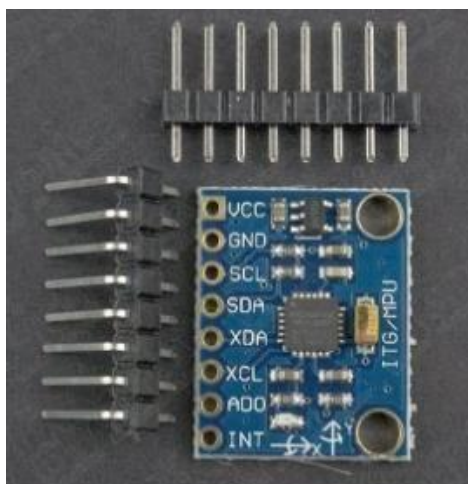


Ilustración 113 Módulo MPU6050.

Tabla 14 Características módulo MPU6050.

CARACTERÍSTICAS	VALOR	CARACTERÍSTICAS	VALOR
Referencia	MPU 6050	Voltaje de entrada	3 VDC 3.3 VDC – 5 VDC
Rango acelerómetro	2g 4g 8g 16g	Rango giroscopio	250°/Segundo 500°/Segundo 1000°/Segundo 2000°/Segundo
Grados de libertad	6	Interfaz	I2C
Convertor	AD 16 bits	Salida	Digital

4.7.3. DRIVERS

En este apartado se mostrarán los drivers o módulos utilizados para el control correcto del mecanismo, aquí se encontrarán el módulo bluetooth encargado de la comunicación inalámbrica de la aplicación con el vehículo y los drivers de motores para el control de los actuadores (motorreductores), a continuación, se muestran las referencias y características:

- **MODULO BLUETOOTH**



Ilustración 114 Módulo bluetooth HC-05.

Tabla 15 Características módulo bluetooth.

CARACTERÍSTICAS	VALOR	CARACTERÍSTICAS	VALOR
Chip	BC417143	Frecuencia	2.4GHz banda ISM
Voltaje de entrada	3.6V - 6V	Modulación	GFSK
Corriente de entrada	8mA	Tipo Asíncrono	2.1Mbps (Max) 160kbps
Temperatura de operación	-20°C 75°C	Tipo Sincrónico	1Mbps
Funciones de seguridad	Autenticación y encriptación	Velocidad	1Mbps
Interfaz serial	TTL	Antena	Integrada
Protocolo Bluetooth	Bluetooth v2.0+EDR	Alcance	10 metros
Potencia de transmisión	4dBm, Clase 2	Perfil	Wireless serial port

- DRIVER DE MOTORES L298N



Ilustración 115 Módulo L298N.

Tabla 16 Características driver de motores L298N.

CARACTERÍSTICAS	VALOR	CARACTERÍSTICAS	VALOR
Controlador	L298/ Doble Puente H	Potencia de salida	25W
Interfaz de potencia	7V 46V	Luces indicadoras	Encendido, control, dirección
Corriente máxima	2A por canal	Temperatura de operación	-20°C 135°C
Voltaje de control	5V	Corriente de control	36mA
Nivel de entrada de señal de control (Alto)	$2.3V \leq V_{high} \leq V_{ss}$	Nivel de entrada de señal de control (Bajo)	$-0.3V \leq V_{low} \leq 1.5V$

Tabla 17 Tabla de verdad salida motor A.

ENA	EN 1	EN 2	Descripción
0	N/A	N/A	Motor A está apagado.
1	0	0	Motor A se detiene (frenado).
1	0	1	El motor A está encendido y da vuelta al revés.
1	1	0	Motor A está en y hacia delante de giro.
1	1	1	Motor A se detiene (frenado).

Tabla 18 Tabla de verdad salida motor B.

ENB	EN 3	EN 4	Descripción
0	N/A	N/A	Motor B está apagado.
1	0	0	Motor B se detiene (frenado).
1	0	1	Motor B está encendido y da vuelta al revés.
1	1	0	Motor B está en y hacia delante de giro.
1	1	1	Motor B se detiene (frenado).

- **DRIVER DE MOTORES MONSTER – VNH2SP30**

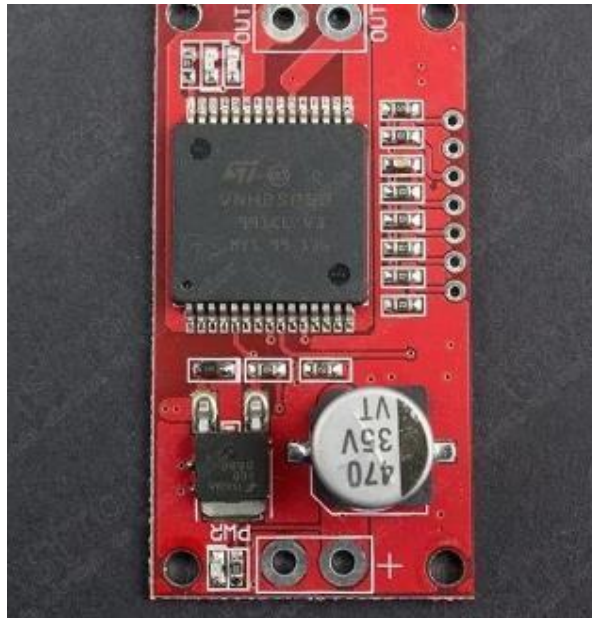


Ilustración 116 Driver VNH2SP30.

Tabla 19 Características driver VNH2SP30.

CARACTERÍSTICAS	VALOR	CARACTERÍSTICAS	VALOR
Alimentación DC	3.6V - 5.5V	Corriente de salida	30 amperios máximo
Alimentación de motores (CC)	16V – 41V	Frecuencia máxima de PWM	20 KHz
Voltaje de entrada	5V	Resistencia de encendido MOSFET	19 M Ω

4.7.4. CONTROLADOR

En base a todos los actuadores y sensores seleccionados anteriormente, se escogió un microcontrolador el cual pueda conectarse con todos los dispositivos anteriores para que al cargar el programa se realice el control del vehículo (activación de motores, lectura del sensor, envío de datos, etc.), por tal motivo se seleccionó el siguiente microcontrolador de la familia de Arduino®.

- **ARDUINO MEGA 2560**



Ilustración 117 Arduino mega 2560.

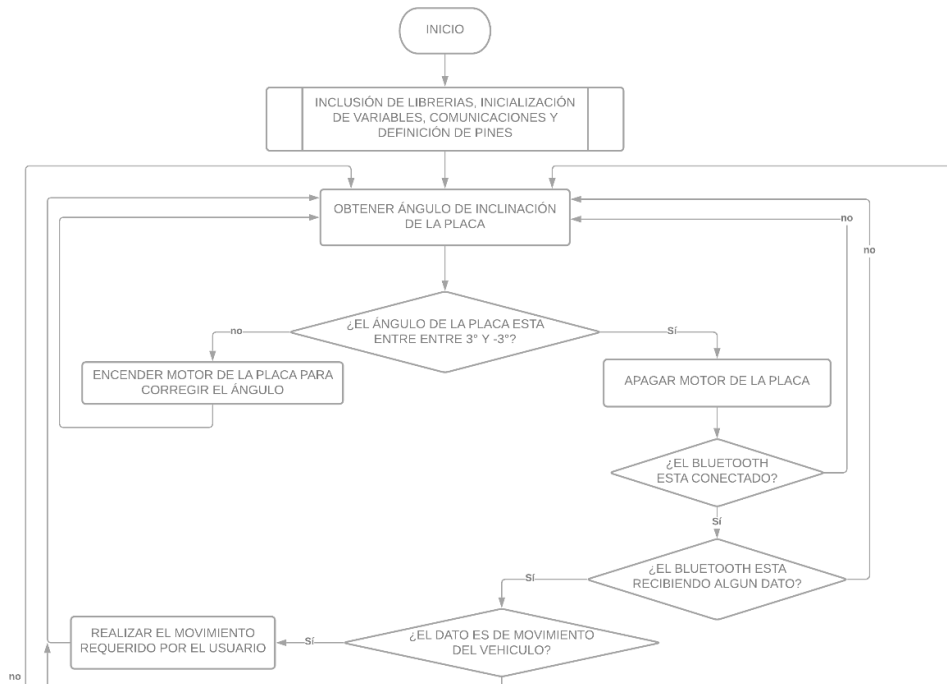
Tabla 20 Características del arduino mega 2560.

CARACTERÍSTICAS	VALOR	CARACTERÍSTICAS	VALOR
Voltaje de operación	5V	Microcontrolador	ATMEGA2560
Pines analógicos de entrada	16	Pines digitales entradas/salidas	54 (15 pines para señal PWM a la salida)
Corriente de salida DC todos pines digitales	40mA	Corriente DC por el pin de 3.3V	50mA
Memoria Flash	256KB (8KB para el arranque)	SRAM	8KB
EEPROM	4KB	Frecuencia de reloj	16MHz

4.8. PROGRAMACIÓN

En este inciso se muestra la programación realizada para que el microcontrolador, en este caso un arduino mega 2560, controle todas las acciones que debe realizar el vehículo. Los datos que recibe el microcontrolador son enviados mediante una aplicación para teléfono celular, la cual también fue realizada por los integrantes del proyecto, dicha aplicación se desglosa más adelante en este documento.

Inicialmente se creó un diagrama de flujo general con las acciones a realizar con el mecanismo, dicho diagrama es para la programación del microcontrolador, y de esta manera se estableció un orden de realización de las actividades en el código, inicialmente se recibirá el dato del usuario, enviado por la aplicación, y con esa información se selecciona una acción a realizar, sea mover el vehículo, cambiar de orientación para moverse en todas las direcciones, depositar la semilla en la posición que se encuentra el vehículo o cambiar el caudal proveniente del tanque para la realización del riego. El diagrama anteriormente mencionado se muestra a continuación.



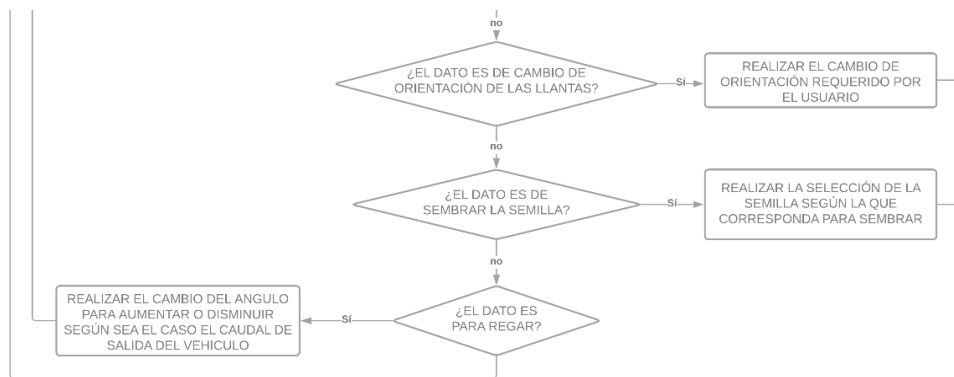


Ilustración 118 Diagrama de flujo para el microcontrolador.

4.8.1. ARDUINO

La programación se realizó en la IDE de Arduino® (para conocer el código completo dirigirse a los anexos en el apartado código arduino). En la siguiente imagen se muestra a grandes rasgos el programa realizado para el microcontrolador, con sus respectivas subfunciones para la realización de cada actividad:

```

122 // CONFIGURACIÓN DE ACCIÓN A REALIZAR
123 void MotoresTransporte() {
147 // MOVIMIENTO DE LOS SERVOMOTORES DE DIRECCIÓN
148 void ServosDireccion() {
160 // MOVIMIENTO DEL SERVOMOTOR DE LA VALVULA DE RIEGO
161 void Riego() {
167 // ACCIÓN DE SEMBRAR
168 void Siembra() {
281 // CONFIGURACIÓN MOTOR PLACA
282 void motorGo(uint8_t motor, uint8_t direct, uint8_t pwm) {
299 // OBTENCIÓN DEL ÁNGULO DE LA PLACA
300 void getAngulo() {
329 // CONFIGURACIÓN DE PINES E INICIALIZACIÓN DE LIBRERIAS
330 void setup() {
385 void loop() {
386   getAngulo();
387   //MOVER LA PLACA PARA QUE QUEDE ENTRE -3° Y 3°
388   if (angulo_prom >= -3 && angulo_prom <= 3) { //ÁNGULO EN ESTE RANGO ES CASI HORIZONTAL
389     motorGo(0,0,0);
390     Serial.println("stop");
391   }
392   else if (angulo_prom < -3) { //ÁNGULO MENOR QUE -3° SE GIRA EN CONTRA DE LAS MANECILLAS DEL RELOJ
393     motorGo(0,1,70);
394     Serial.println("down");
395   }
396   else { //ÁNGULO MAYOR QUE 3° SE GIRA CON LAS MANECILLAS DEL RELOJ
397     motorGo(0,2,255);
398     Serial.println("up");
399   }

```



```

400▯ if (Serial1.available()){
401   valor = Serial1.read();
402 // CLASIFICACIÓN DE RUTINAS
403▯   if (valor == 'A'){
404     MotoresTransporte();
405 //     Serial.println(valor);
406   }
407▯   if (valor == 'B'){
408     ServosDireccion();
409 //     Serial.println(valor);
410   }
411▯   if (valor == 'C'){
412     Riego();
413 //     Serial.println(valor);
414   }
415▯   if (valor == 'D'){
416     Siembra();
417 //     Serial.println(valor);
418   }
419▯   if (valor == 'Y'){
420▯   do{
421     motorGo(0,2,255);
422     getAngulo();
423 //     Serial.println("INCLINAR");
424   }while (angulo_prom > -22);
425▯   do{
426     motorGo(0,0,0);
427 //     Serial.println("INCLINAR DETENIDO");
428▯     if (Serial1.available()){
429       valor = Serial1.read();
430     }
431   }while(valor == 'Y');
432   }
433 }
434 }

```

Ilustración 119 Código de Arduino comprimido.

4.8.2. APP INVENTOR

Mediante la página web MIT App Inventor (<https://appinventor.mit.edu/>) se desarrolló una aplicación móvil que le permitirá al operario manipular el vehículo (el desarrollo de la app se muestra a continuación). Esta plataforma es de tipo Open Source, lo que permitió su uso sin ningún tipo de costo y la generación de app de una manera fácil, rápida y sencilla. Debido a que como ya se mencionó los datos serán enviados vía bluetooth la aplicación que controla el movimiento del robot utilizara dicho recurso del smartphone. La información sobre la aplicación se presentará de la siguiente manera:

inicialmente el apartado gráfico (como se ve) y posteriormente la programación del mismo (como funciona).

4.8.2.1. VENTANA PRINCIPAL

La ventana principal de la aplicación consiste en un apartado donde el usuario encontrará un mensaje de bienvenida y dos botones para la selección del control del vehículo, el primer botón llamado “control botones” y el segundo llamado “comandos por voz” que al ser presionados cada uno de ellos redirigirá al usuario a una nueva ventana para controlar el vehículo, a continuación se muestra el apartado grafico de la aplicación (como se ve) y seguido de esto el apartado lógico (programación para el funcionamiento).



Ilustración 120 Ventana de inicio de la aplicación.

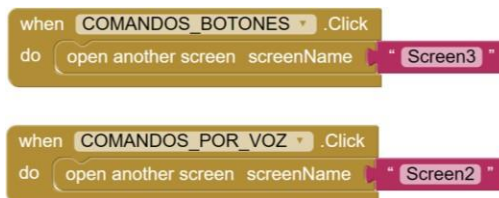


Ilustración 121 Programación de la ventana principal.

4.8.2.2. VENTANA COMANDOS POR VOZ

Esta ventana aparece al momento de que el usuario presione en la ventana principal el botón de “comandos por voz”, como su nombre lo indica esta ventana permite manipular el vehículo únicamente por comandos de voz, al ingresar a este apartado encontramos 2 textos el primero es fijo y corresponde al título de la ventana “comandos por voz” y el segundo es un texto dinámico que mostrara el comando detectado, además también encontraremos 2 botones el primero es un micrófono, el cual activara esta herramienta del teléfono, y el segundo un botón con nombre de “conexión bluetooth” el cual abrirá un menú con los dispositivos bluetooth emparejados con el dispositivo, donde se deberá elegir el dispositivo bluetooth del mecanismo, como se observa a continuación.

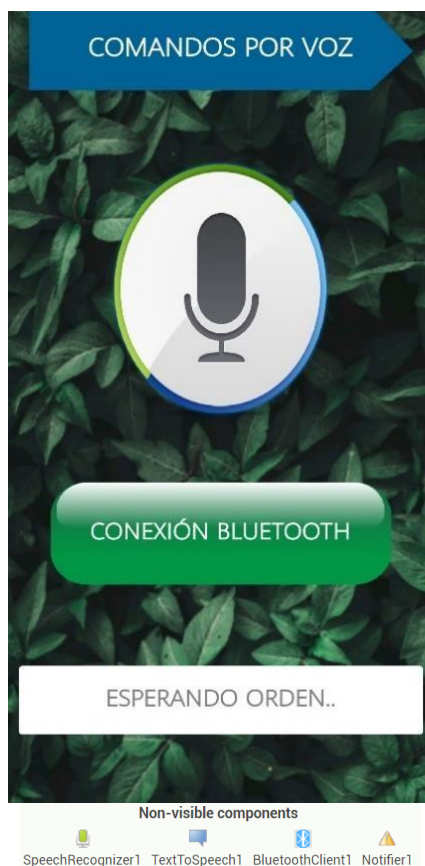


Ilustración 122 Ventana de control por voz.

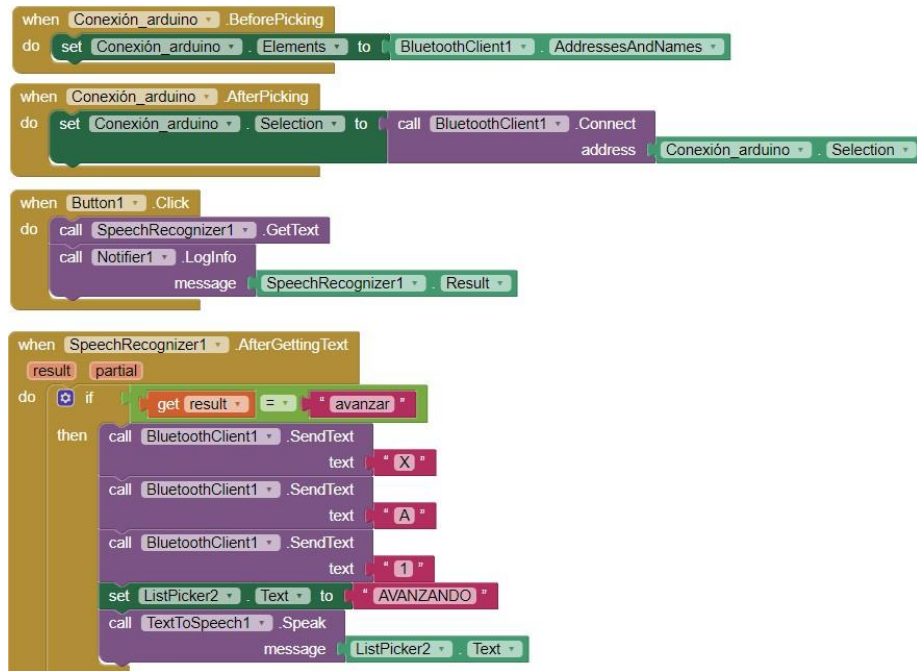


Ilustración 123 Parte 1 de la programación de la ventana de control por voz.

Como se muestra en la ilustración anterior, la programación de la ventana de comandos por voz es más compleja que la inicial, por tal motivo la parte faltante de la programación realizada se encontrara en el apartado de anexos, debido a que allí están programados todos los comandos que el usuario podrá decir para controlar el vehículo. Entre los comandos de voz que el usuario podrá usar están:

Tabla 21 Comandos por voz reconocibles en la aplicación.

COMANDO	ACCIÓN
Avanzar*	El vehículo se mueve hacia adelante
Retroceder*	El vehículo se mueve hacia atrás
Parar	El vehículo se detiene cualquier acción realizada
Girar izquierda*	El vehículo comienza a girar las ruedas hacia la izquierda
Girar derecha*	El vehículo comienza a girar las ruedas hacia la derecha
Sembrar**	El vehículo deja caer una semilla

Abrir válvula**	El vehículo comienza a abrir la válvula de riego
Cerrar válvula**	El vehículo comienza a cerrar la válvula de riego

*Estos comandos no se detienen hasta que se dé la orden de "Parar".
 **Comandos que funcionaran dependiendo del complemento utilizado en el vehículo, si no está conectado el complemento se enviará la señal, pero no se verá reflejada la acción en el vehículo.

4.8.2.3. VENTANA CONTROL POR BOTONES

Esta ventana aparece al momento de que el usuario presione en la ventana principal el botón de "control botones", como su nombre lo indica esta ventana permite manipular el vehículo únicamente por botones, al ingresar a este apartado encontramos subsecciones tituladas como "transporte", "ángulo de giro", "siembra" y "riego", como se muestra a continuación:



Ilustración 124 Apartado de transporte en la ventana de control por botones.

Como se puede observar en la imagen anterior, tenemos el mismo botón de conexión bluetooth del que se habló en la ventana "comandos por voz" además tenemos 3 botones nuevos, el primero de ellos es una flecha

indicando hacia arriba el cual cumple la función de avanzar, de manera similar el botón con la flecha que indica hacia abajo cumple con la función de retroceder y el tercer botón una mano blanca en un rombo rojo el cual cumple la función de detener.



Ilustración 125 Apartado de ángulo de giro en la ventana de control por botones.

En la imagen anterior se puede observar un “slider” el cual está asociado con la dirección de las ruedas del vehículo, entre más a la derecha se encuentre el slider en la pantalla del teléfono más a la derecha giraran las llantas del vehículo.

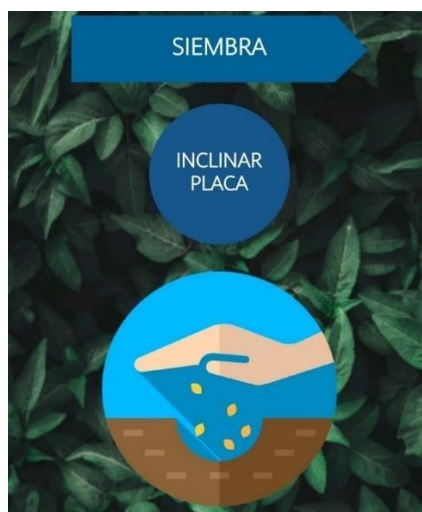


Ilustración 126 Apartado de siembra en la ventana de control por botones.

Como se puede observar en la imagen anterior, tenemos 2 botones el primero de ellos con el texto “inclinación placa” el cual hace que el vehículo tome una posición definida para que sea más fácil agregar los complementos de siembra y el segundo botón el cual muestra una mano depositando semillas en un agujero el cual es el encargado de rotar los discos de siembra en la placa para que el vehículo deje caer una semilla, el orden de salida de las semillas está definido por software.



Ilustración 127 Apartado de riego en la ventana de control por botones.

En la imagen anterior se puede observar un “slider” el cual está asociado con el servomotor que abre y cierra la válvula que dejará gotear el contenido del tanque de riego, entre más a la derecha se encuentra el slider estará más abierta la válvula de riego.

En la siguiente imagen se muestra una fracción de la parte lógica de la ventana “control botones”, para ver la programación completa diríjase al apartado de anexos donde encontrara el código completo, en este código se encuentra la acción de cada botón con el respectivo envío de datos.

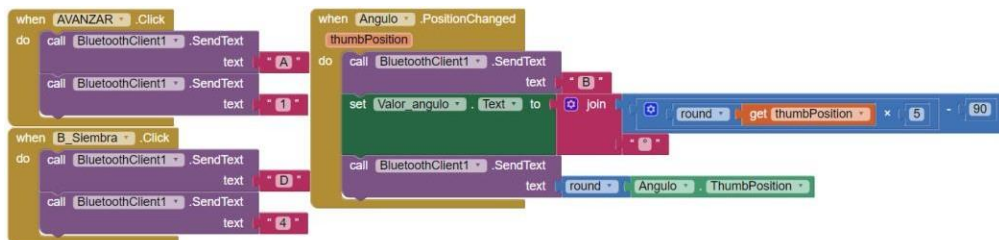


Ilustración 128 Parte 1 de la programación de la ventana de control botones.

4.9. DIAGRAMA ELÉCTRICO

Con el código programado en la IDE de Arduino® se realizó una simulación con los elementos previamente seleccionados los cuales son:

- 1 Arduino Mega
- 11 servomotores (1 de 90°, 6 de 180° y 4 de 270°)

- 7 motorreductores
- 1 modulo bluetooth HC-05
- 3 drivers L298N
- 1 driver VNH2SP30
- 1 acelerómetro y giroscopio MPU6050

El diagrama electrónico se basa en un esquemático realizado en el software de Proteus ®, en el cual se muestran cada una de las conexiones a realizar para todos los actuadores, sensores, driver y el controlador, las fuentes de alimentación necesarias no se encuentran en el diagrama, pero se muestran los pines de conexión y el voltaje necesario para cada pin.

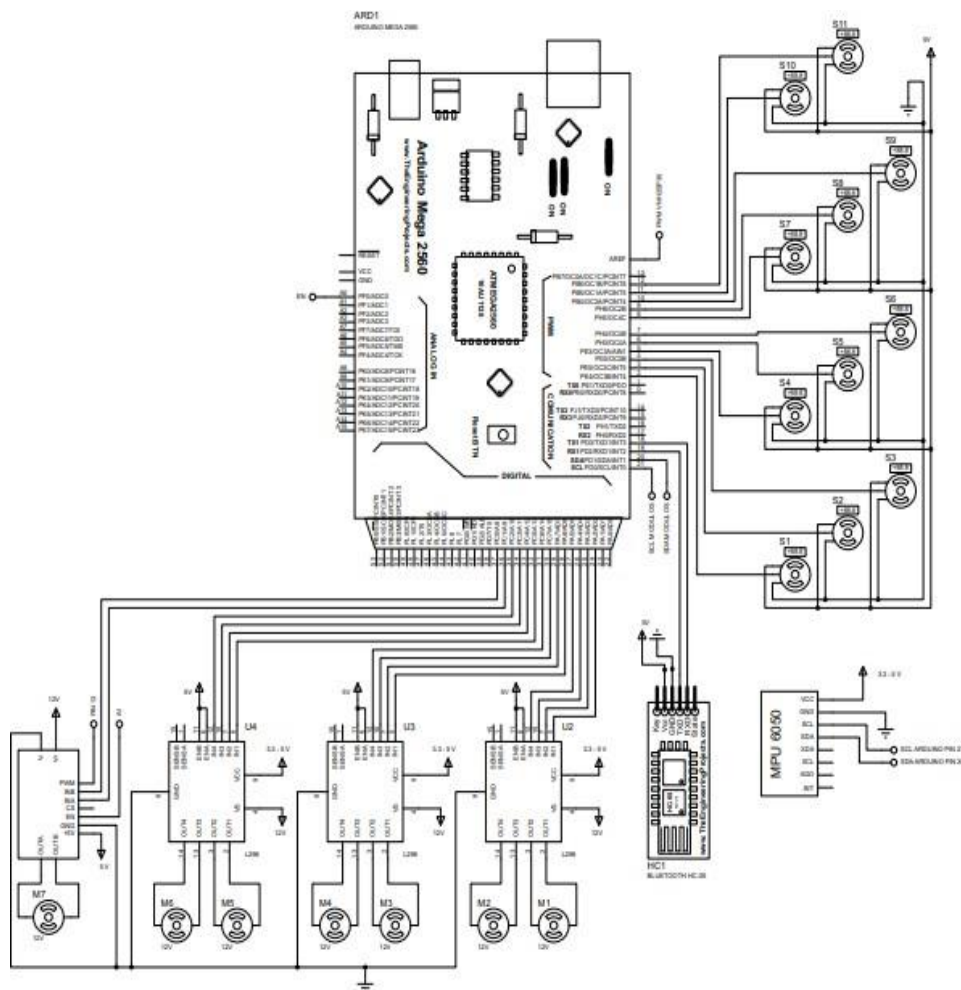


Ilustración 129 Circuito electrónico.

4.9.1. CONEXIÓN SERVOMOTORES

En este apartado se muestran las conexiones de los 11 servomotores los cuales estarán dispuestos de la siguiente manera:

- 4 para cumplir la función de siembra
- 6 para dirección del mecanismo
- 1 para cumplir la función de riego

En la siguiente imagen se muestra un acercamiento de la parte de la imagen donde se evidencia de mejor manera como se ven las conexiones de los servomotores con el microcontrolador.

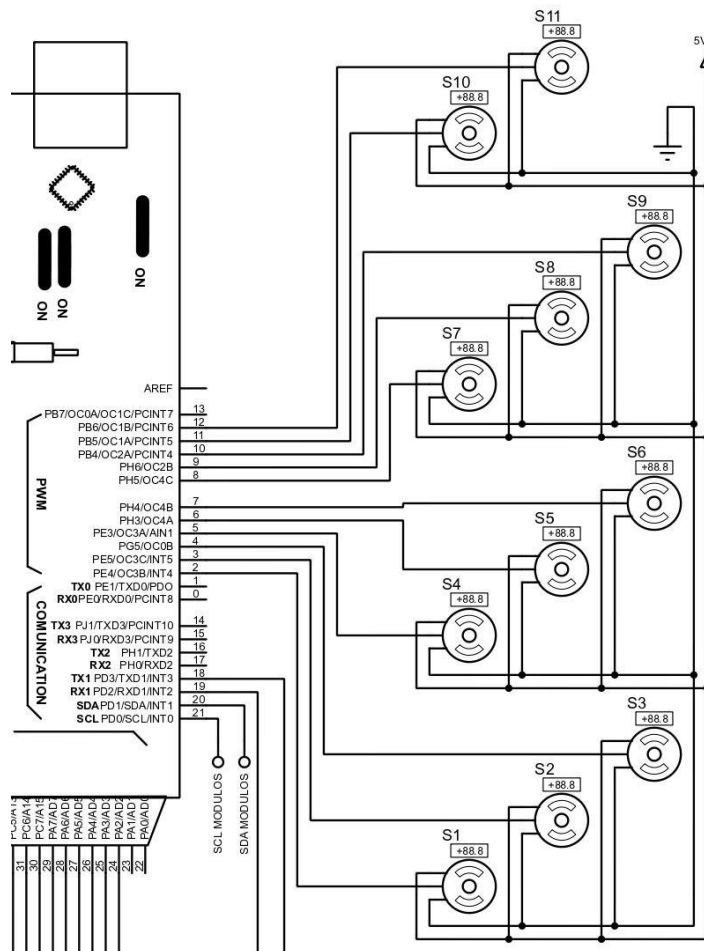


Ilustración 130 Conexión servomotores con el arduino.

4.9.2. CONEXIÓN MPU6050 Y MODULO BLUETOOTH

En la sección se mostrará la conexión del módulo bluetooth HC-05 y el giroscopio y acelerómetro MPU6050, recordando que el módulo bluetooth se emplea para el envío y recepción de datos entre la aplicación y el microcontrolador y por su parte la MPU6050 tiene la función de evaluar el grado de inclinación de la placa y posteriormente mantenerla de manera horizontal.

En la siguiente imagen se muestra la conexión de los módulos mencionados anteriormente con el microcontrolador.

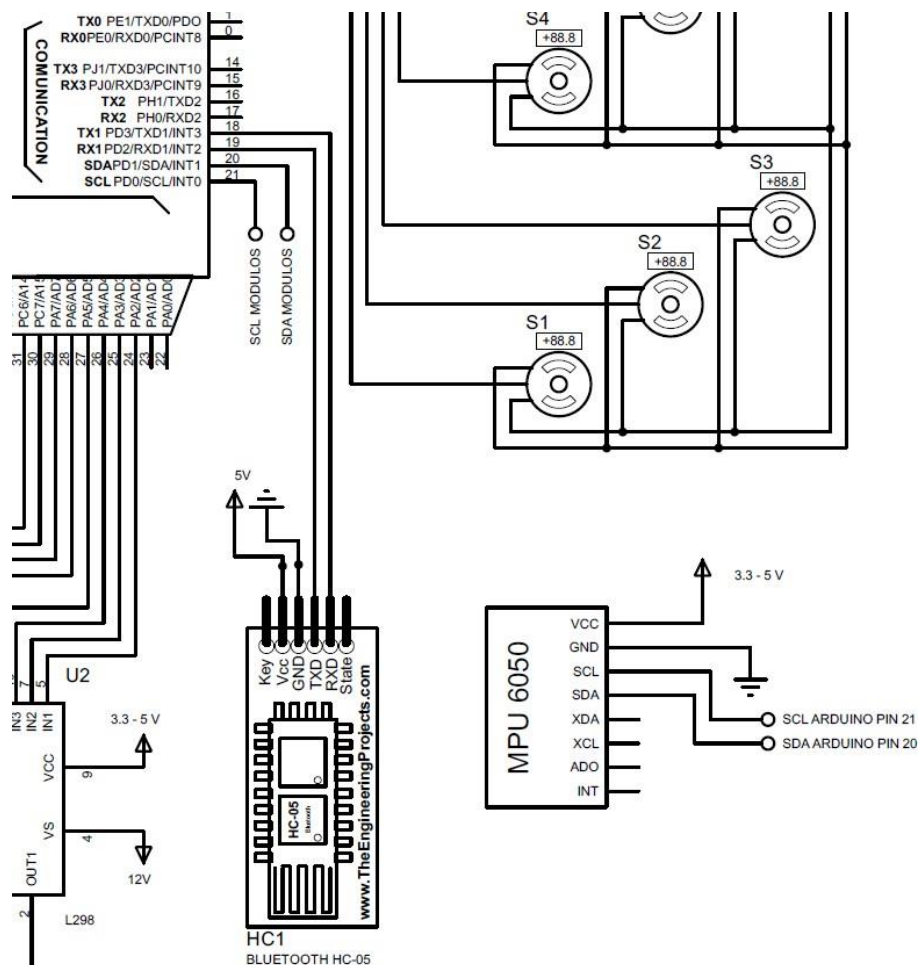


Ilustración 131 Conexión modulo bluetooth y MPU6050 con el arduino.

4.9.3. CONEXIÓN DRIVERS Y MOTORREDUCTORES

En esta sección se muestra la conexión de los 7 motorreductores con sus respectivos drivers los cuales están dispuestos de la siguiente manera:

- 6 motorreductores para el avance del mecanismo.
- 1 motorreductor para el control de la posición de la placa.
- 3 drivers L298 para el control de los motores de avance.
- 1 driver VNH2SP30 para el control del motor de posición de la placa.

Recordemos que los motorreductores para el avance del mecanismo están ubicados en la parte inferior de las c's conectados directamente a las ruedas y el motorreductor para el control de la posición de la placa está conectado a los piñones en la placa. La conexión de los drivers y de los motorreductores al microcontrolador se muestra a continuación.

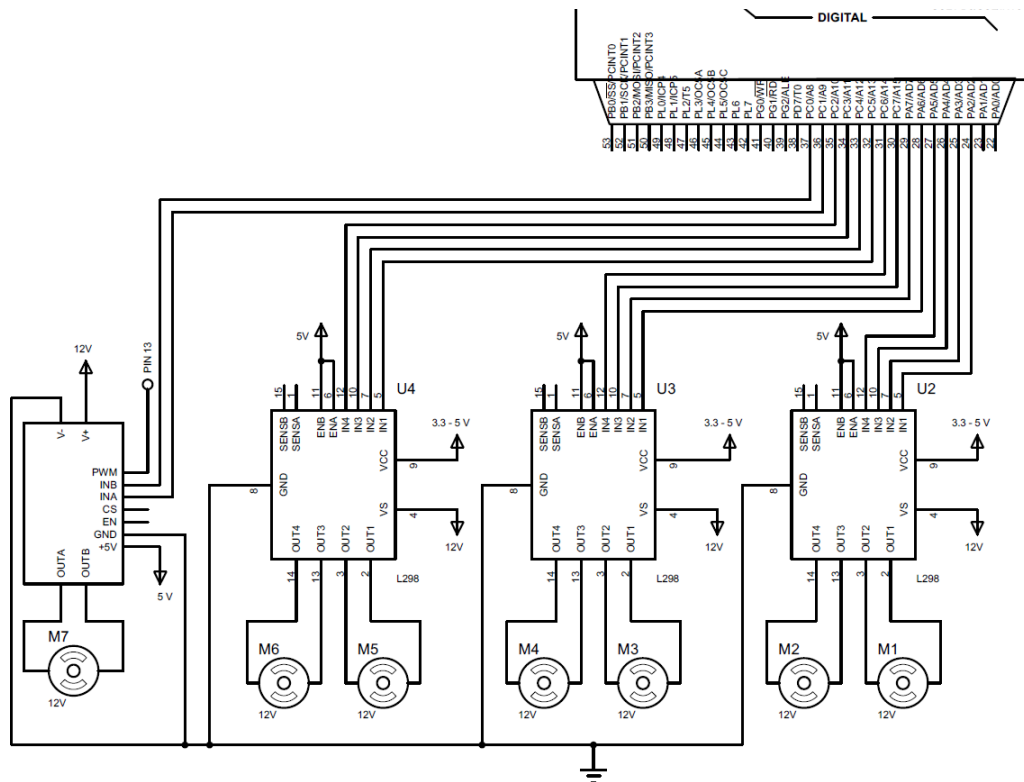


Ilustración 132 Conexión drivers y motorreductores con el arduino.

5. RESULTADOS

En la siguiente sección se podrá evidenciar cada uno de los resultados alcanzados en lo que a la velocidad del rover, ángulos de giro del rover, altura máxima de obstáculos y funcionalidades respecta; esto con el objetivo de enfatizar en el plano realista que plantean los resultados para el rover, y lo que en su momento puede indicar futuras mejoras para dicho vehículo.

5.1. TRANSPORTE

Para la parte de transporte se logró la construcción total del vehículo y los componentes necesarios para cumplir esta función, como lo fueron los piñones de la placa y la lámina para la carga.

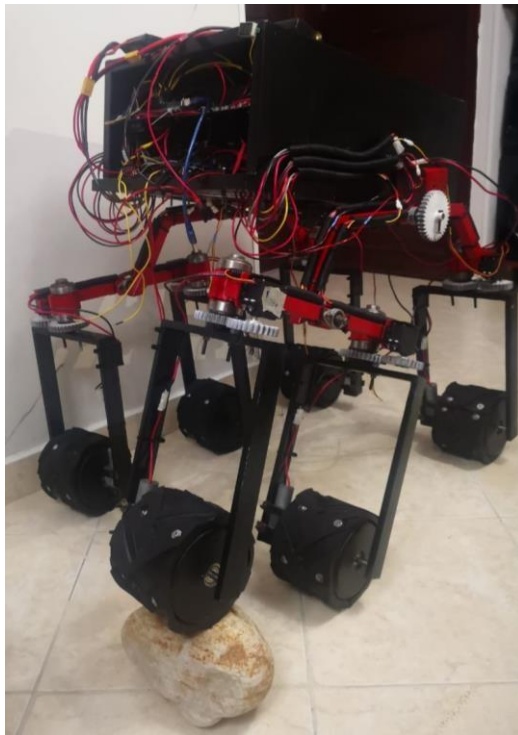


Ilustración 133 Vista isométrica con escualización.

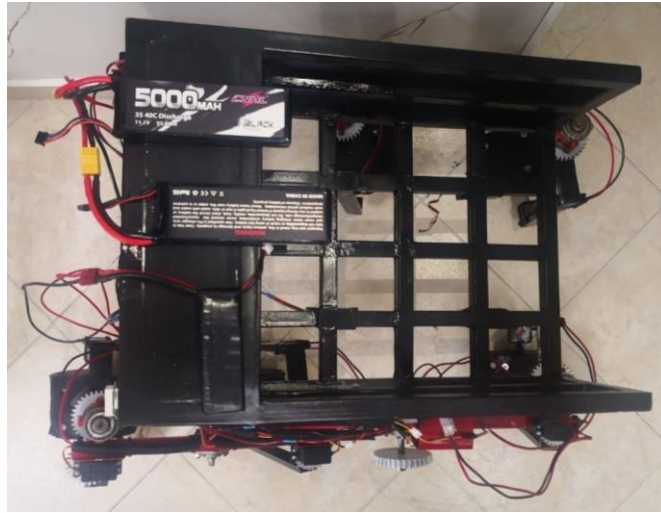


Ilustración 134 Vista superior con escualización.

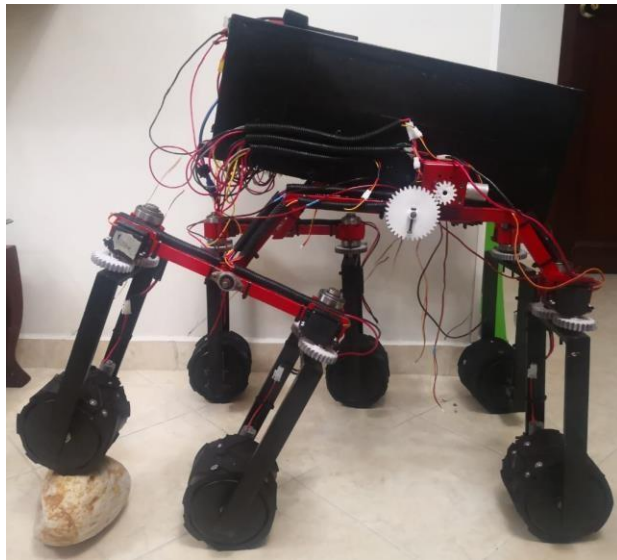


Ilustración 135 Vista lateral con escualización.



Ilustración 136 Vista frontal con escualización.

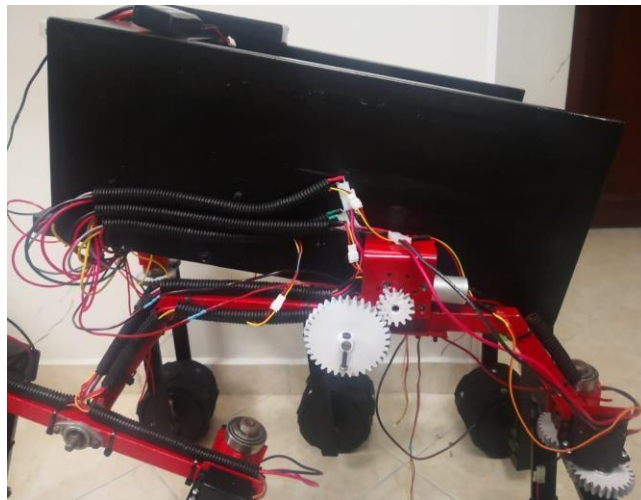


Ilustración 137 Piñones para control de placa.



Ilustración 138 Bogie escualizado.

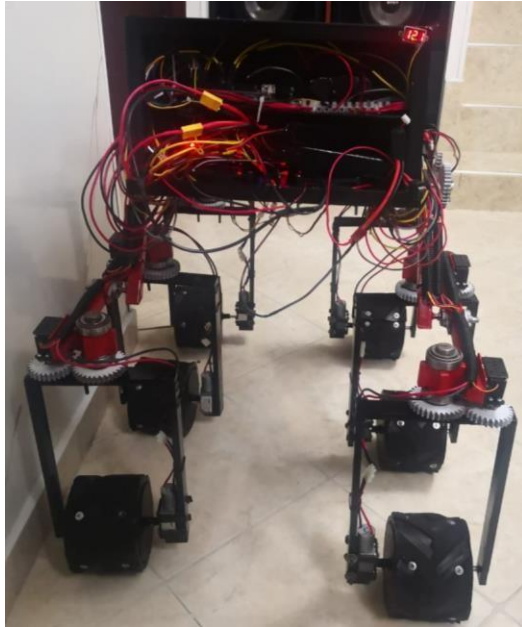


Ilustración 139 Vista frontal con circuito energizado.



Ilustración 140 Lámina de transporte incorporada.

5.1.1. ÁNGULOS DE GIRO:

Los ángulos de giro requeridos por cada servomotor eran de 180 grados en total, ubicándolos en un ángulo de 0 para un control de -90 y 90 grados. Los servomotores adquiridos fueron de 180 grados, pero estos no cumplían con dicha amplitud al momento de moverse. Siempre presentaban cierta incertidumbre acercándose al máximo ángulo deseado, pero no lograban la posición de 180 grados.



Ilustración 141 Mecanismo de dirección.

La carga máxima calculada por el prototipo fue alcanzada en las pruebas de campo con pesas, siendo esta carga de 12.5 kg, sin embargo, al momento de utilizar la placa en la prueba con las cebollas, se probó con una carga máxima de 6 kg.



Ilustración 142 Vehículo en modo transporte con carga en terreno – A.



Ilustración 143 Vehículo en modo transporte con carga en terreno – B.



Ilustración 144 Placa con carga en terreno.

5.1.2. VELOCIDAD MÁXIMA DEL PROTOTIPO

Los motores adquiridos al ser muy lentos, no se estableció un control de PWM para ellos, sino que se decidió que estuvieran siempre a velocidad máxima la cual es de 12 RPM, por las distancias que tiene que recorrer el vehículo en el terreno del cultivo.

5.1.3. ALTURA DE OBSTÁCULOS

Para aclarar la altura máxima de los obstáculos rebasados, se debe tener en cuenta que el prototipo no se pudo probar en el cultivo, pero aun así se realizaron las pruebas en campo, rebasando obstáculos de hasta 9 cm, esto tomando en cuenta los límites propios del prototipo.

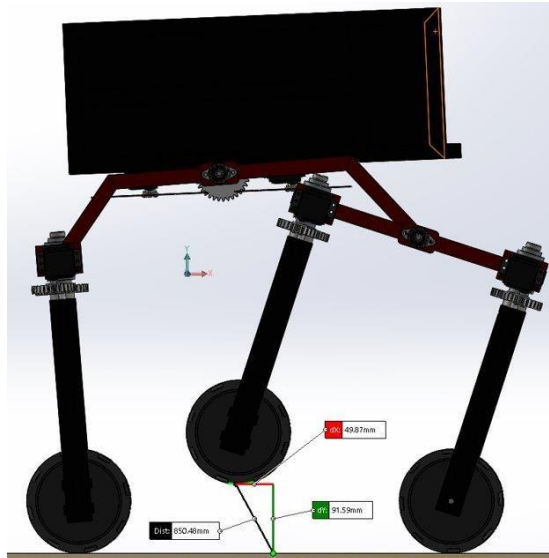


Ilustración 145 Altura máxima del obstáculo.

5.2. SIEMBRA

En la parte de siembra, se podrá evidenciar en las siguientes imágenes todos los componentes necesarios para cumplir esta función, como también se evidencia una fotografía en la que se está realizando una prueba del prototipo en el campo, en la que se muestra al campesino el funcionamiento.



Ilustración 146 Discos de siembra acoplados.

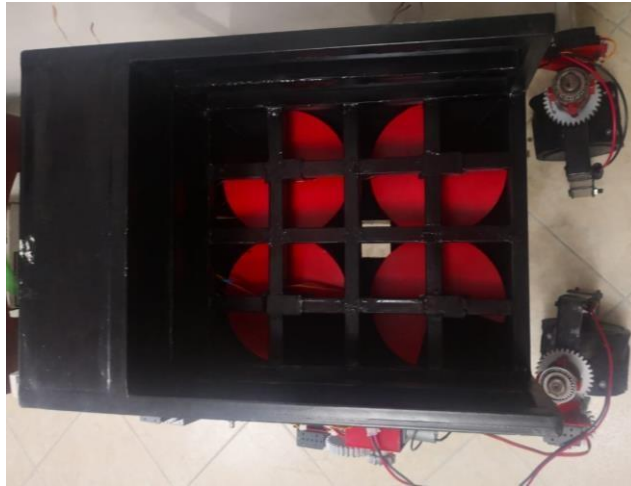


Ilustración 147 Vista superior discos de siembra con tolva acoplados.

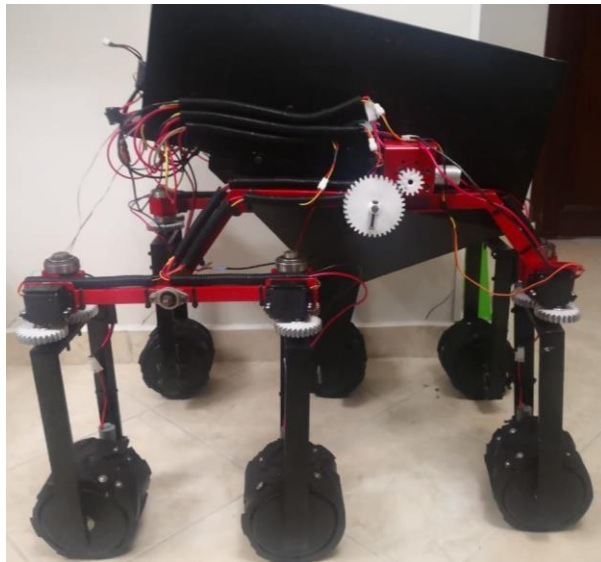


Ilustración 148 Vista lateral con tolva acoplada.



Ilustración 149 Vista frontal con tolva acoplada.



Ilustración 150 Vehículo en modo siembra con semillas en terreno.

5.2.1. VELOCIDAD DE LA SIEMBRA:

5.3. RIEGO

Finalmente, para la parte de riego, a continuación, se podrá evidenciar como en las funciones anteriores, cada uno de los componentes necesarios para el cumplimiento de esta función, en este caso, el sistema de la válvula para el paso del agua y el sistema de mangueras distribuidas. Siguiendo a estas, se podrá observar unas imágenes mostrando el momento en que se presentó al campesino todo el funcionamiento.



Ilustración 151 Mangueras del sistema de riego.

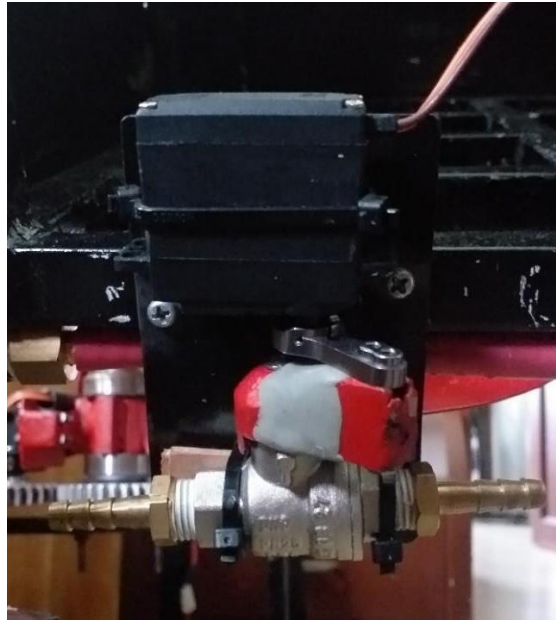


Ilustración 152 Servomotor y válvula.

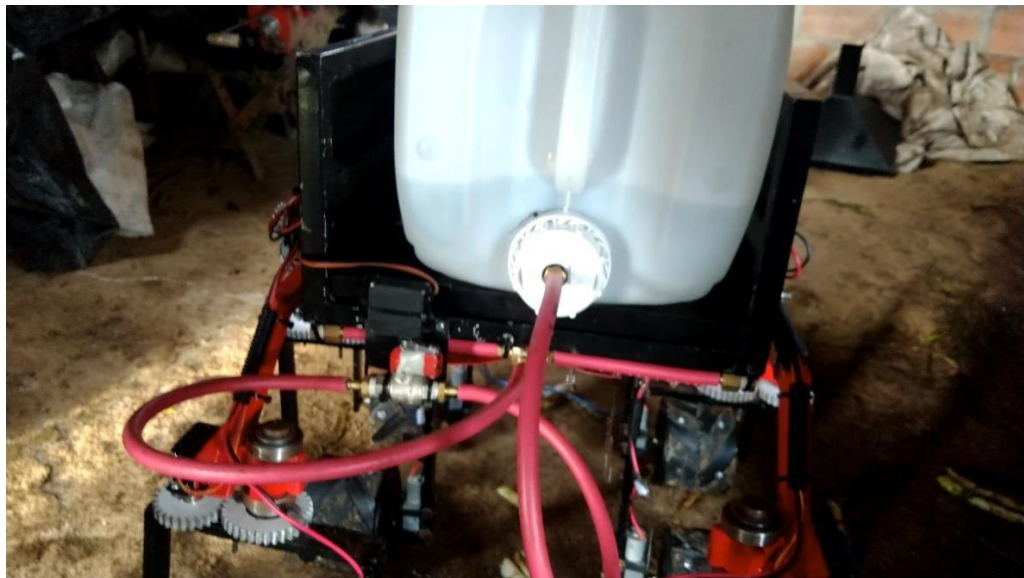


Ilustración 153 Vehículo en modo riego en terreno.



Ilustración 154 Sistema de mangueras externas con tanque.

5.4. COSTOS

En este apartado se detallan los costos de la realización del prototipo diseñado, costos desde componentes eléctricos y electrónicos, hasta costos de transporte necesarios dando así un total de tres millones novecientos cincuenta mil pesos (\$3.950.000), dicho valor no incluye mano de obra debido a que la construcción fue realizada por los integrantes del proyecto.

5.4.1. COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

La siguiente tabla muestra el componente eléctrico y/o electrónico utilizado, valor unitario, cantidad necesaria y valor total; al final de la misma se encuentra el valor total de los componentes eléctricos y/o electrónicos.

Tabla 22 Costo de componentes electrónicos y eléctricos.

COMPONENTE	VALOR UNITARIO	CANTIDAD A COMPRAR	VALOR
Servomotor MG995 270°	\$ 47.700	4	\$ 190.800
Servomotor MG995 180°	\$ 27.500	6	\$ 165.000
Motorreductor 12V	\$ 60.200	7	\$ 421.400
Driver VNH2SP30	\$ 20.000	1	\$ 20.000
Driver L298N	\$ 9.000	3	\$ 27.000
Bateria 11.1 V 5000 mAh	\$ 140.000	2	\$ 280.000
Bateria 7.4 V 2200 mAh	\$ 80.000	1	\$ 80.000
Acelerometro Giroscopio MPU 6050	\$ 10.000	1	\$ 10.000
Cargador B3	\$ 43.500	1	\$ 43.500
Conector XT60	\$ 3.550	2	\$ 7.100
Arduino Mega 2560	\$ 48.000	1	\$ 48.000
Modulo Bluetooth HC-05	\$ 18.000	1	\$ 18.000
Voltmetro	\$ 10.000	1	\$ 10.000
Ventilador	\$ 4.500	2	\$ 9.000
Turbo Ventilador	\$ 9.000	1	\$ 9.000
Jack 2.1 mm	\$ 1.500	1	\$ 1.500
Conector 2 Pines	\$ 2.000	1	\$ 2.000
Conector 2 Pines	\$ 1.100	12	\$ 13.200
Conector 3 Pines	\$ 1.300	13	\$ 16.900
Cable AWG 12	\$ 1.200	1	\$ 1.200
Cable AWG 18	\$ 700	20	\$ 14.000
Cable AWG 20	\$ 600	15	\$ 9.000
Termoencogible 3mm	\$ 700	5	\$ 3.500
Termoencogible 6mm	\$ 1.200	5	\$ 6.000
Interruptor Encendido	\$ 3.000	1	\$ 3.000
Termoprotector	\$ 1.000	4	\$ 4.000
TOTAL:			\$ 1.413.100

Como se puede observar en la tabla anterior el total de componentes eléctricos y electrónicos fue de un millón cuatrocientos diez mil cien pesos (\$1.413.100).

5.4.2. MATERIAL

La siguiente tabla muestra los costos del material empleado para realizar los componentes mecánicos necesarios para el correcto funcionamiento del prototipo. La tabla se encuentra organizada de la siguiente manera: material, valor unitario o valor por metro, dependiendo del material, cantidad a comprar

y valor total del material, al final de la misma tabla se encuentra la suma de todos los valores obtenidos para conocer el valor total del material a utilizar.

Tabla 23 Costos de materiales.

MATERIAL	VALOR UNITARIO	CANTIDAD A COMPRAR	VALOR
Tubo Cuadrado 3/4" Calibre 20	\$ 12 500	2	\$ 25 000
Varilla Cuadrada 11 mm	\$ 17 000	3	\$ 51 000
Varilla Redonda 8 mm	\$ 5 000	1	\$ 5 000
Lamina Calibre 18	\$ 100 000	0.5	\$ 50 000
Tubería Llantas 5 1/2"	\$ 30 000	1	\$ 30 000
Lamina Llantas	\$ 3 000	12	\$ 36 000
Caucho Llantas	\$ 15 000	2.5	\$ 37 500
Grabado de Llantas	\$ 100 000	1	\$ 100 000
Rodamientos 8mm	\$ 3 000	6	\$ 18 000
Rodamientos Conicos	\$ 10 000	12	\$ 120 000
Anillos de Seguridad	\$ 1 500	6	\$ 9 000
Varilla redonda 1 1/4"	\$ 34 000	0.6	\$ 20 400
Rejilla Ventiladores	\$ 2 000	2	\$ 4 000
Chumaceras de Parche KFL08	\$ 8 500	8	\$ 68 000
Discos de Servomotor	\$ 5 000	10	\$ 50 000
Brazo de Servomotor	\$ 7 300	1	\$ 7 300
Platina 1/4x1/8x20cm	\$ 3 000	1	\$ 3 000
Barra Redonda 3"	\$ 20 000	1	\$ 20 000
Barra Redonda 2 1/2"	\$ 16 000	1	\$ 16 000
Barra Redonda 1 3/8"	\$ 2 000	1	\$ 2 000
Fabricación de Piñones	\$ 1 200 000	1	\$ 1 200 000
Platina Refuerzo Placa	\$ 2 000	1	\$ 2 000
Brackets de Servomotor	\$ 7 000	6	\$ 42 000
Eje 8mm Placa	\$ 2 000	1	\$ 2 000
Pintura	\$ 6 500	8	\$ 52 000
Thinner	\$ 5 500	1	\$ 5 500
Bujes	\$ 4 000	6	\$ 24 000
Soldadura	\$ 9 000	3	\$ 27 000
Tornillería	\$ 100	300	\$ 30 000
Herramientas de Desgaste	\$ 1 000	20	\$ 20 000
Accesorios para Riego	\$ 65 000	1	\$ 65 000
Herramienta del Prototipo	\$ 30 000	1	\$ 30 000
TOTAL:			\$ 2 171 700

Cabe aclarar que existen unos costos los cuales son mano de obra (fabricación de piñones y grabado de llantas), estos costos fueron asumidos

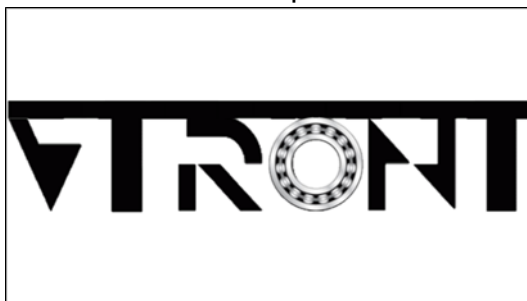
debido a que la universidad en el taller de manufactura no cuenta con la herramienta necesaria para realizar estas actividades, por tal motivo, fue necesario realizar estas operaciones por terceros. Finalmente se tiene un costo total en materiales para la construcción de la estructura de dos millones ciento setenta mil setecientos pesos (\$2.171.700).

5.4.3. TRANSPORTES

En este apartado se incluyen todos los transportes realizados durante el desarrollo del proyecto, tales como, los envíos realizados por las empresas para la entrega de la materia prima, componentes y piezas construidas para la construcción del prototipo, adicionalmente el prototipo fue probado en el terreno objetivo, ubicado en Berlín, Santander, por tal motivo fue necesario el transporte de este desde la ciudad de Bucaramanga, Santander hasta dicho lugar; el total de los gastos de transporte fue de trecientos sesenta y cinco mil doscientos pesos (\$365.200).

5.5. MANUAL DEL USUARIO

Entre los objetivos específicos del proyecto, se encuentra la realización de un manual para que los usuarios puedan utilizar el vehículo, por esta razón, en esta sección se mostrará una descripción de dicho documento.



MANUAL DEL USUARIO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE VEHÍCULO
TIPO ROVER NO TRIPULADO PARA LA SIEMBRA, FERTILIZACIÓN Y
TRANSPORTE DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS EN TERRENOS IRREGULARES
DEL CORREGIMIENTO DE BERLÍN SANTANDER

Ilustración 155 Página de inicio del manual del usuario.

Inicialmente en este documento se encuentra el contenido, en el cual se pueden hallar los siguientes temas:

- Introducción
- Descripción
- Modos del vehículo
- Funcionamiento
- Mantenimiento, seguridades y recomendaciones
- Diagramas de conexión

En la introducción, está la descripción apertura del documento y que es importante leerla para comprender y utilizar dicho documento como es debido. Posteriormente esta la descripción en donde se encuentran las características técnicas del vehículo y las características de la aplicación, en la primera, está la descripción de los modos de operación y funcionalidades, y en la segunda, está la descripción general de la aplicación creada.

En la sección de los modos del vehículo están cada uno de los pasos que el usuario debe seguir para la transición entre cada modo de operación del vehículo; este cuenta con imágenes alusivas y con la descripción de las piezas a cambiar para usar el vehículo en los diferentes modos. La sección de funcionamiento cuenta con la descripción detallada de cada una de las ventanas que posee la aplicación, esto es, una descripción por cada ventana, explicando el uso de cada parte que la compone, como lo son: botones, sliders, secciones etc.

Por último, están las secciones de mantenimiento, seguridades, recomendaciones y los diagramas de conexión, en donde se dan a conocer las descripciones para el cuidado y buen uso del vehículo, con las respectivas conexiones para que sean utilizados como refuerzo en caso de que el vehículo sufra algún percance. Es de aclarar que, el manual del usuario se encuentra completo en la sección de los anexos.

5.6. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Durante las pruebas realizadas al prototipo a pesar de que el funcionamiento de este fue el esperado, se decidió incluir esta sección de recomendaciones y mejoras que se pueden implementar para que el vehículo tipo rover funcione en mejores condiciones y se obtengan resultados más favorables.

- No se recomienda utilizar servomotores para el direccionamiento de las ruedas debido a que estos tienen una región de operación inferior a la nominal y el torque de los mismos es bajo, se recomienda utilizar un motorreductor con engranaje para conocer el ángulo al que se encuentra la llanta, además se recomienda que sea un motor de alto torque para evitar que al momento de que el vehículo se apague estos se descalibren.
- Se recomienda utilizar puente h MONSTER VNH2SP30 para todos los motorreductores a implementar en el prototipo debido a que al soportar altas corrientes el motor trabajará de mejor manera. Nos dimos cuenta en las pruebas que al utilizar el driver de motores L298N este no tenía igual rendimiento que el VNH2SP30, debido a que el primero está limitado a corrientes de 2 amperios que es un poco inferior a la corriente nominal del motor, datos entregados por el fabricante luego de la implementación del prototipo.
- Se sugiere utilizar una rejilla separadora con el fin de limitar el espacio que debe ocupar cada una de las semillas, esto para evitar que la semilla al girar el plato se caiga y no siembre al momento de que llegue su momento haciendo una falsa siembra.
- Se recomienda no implementar el sistema de riego por goteo debido a que es muy lento y desperdicia cantidades de líquido puesto que el control se ejerce y tiene un tiempo de respuesta lento, se recomienda utilizar un sistema dosificador con la servo-válvula y expulsarlo del vehículo a presión con una bomba de aire que esparza el líquido atomizándolo en el cultivo, pero si se recomienda que se atomice directamente las plantas.
- Se sugiere darle simetría al mecanismo para controlar el ángulo de inclinación de la placa agregando otro motor con el sistema de

engranajes necesarios para que la fuerza sea ejercida en ambos lados del vehículo, con esto no se tienen sobreesfuerzos en el motor y aumentan el tiempo de vida del mismo, además de aumentar la carga a soportar por el vehículo.

6. CONCLUSIONES

- El diseño del rocker bogie es muy útil para terrenos irregulares por tal motivo es viable su implementación en el sector agrícola por su capacidad al momento de superar obstáculos y desplazarse.
- La escualización que permite el mecanismo rocker bogie es pertinente para el tipo de geografía accidentada que se tiene en Colombia, debido a que dicha escualización, permite adaptarse de mejor manera al terreno del cultivo que se esté trabajando.
- Este robot ha sido implementado por la NASA para la exploración de otros planetas, gracias a su gran adaptabilidad al terreno, así que también es posible utilizarse para el reconocimiento de lugares de difícil acceso.
- Es posible mejorar la utilidad del prototipo, añadiendo a este, brazos manipuladores que lo puedan hacer más versátil al momento de resolución de problemas, aumentando su nivel de complejidad robótica, pero con un gran futuro para el uso de la automatización y la inteligencia artificial.
- Las llantas del mecanismo rocker bogie pueden representar un factor muy importante en el desarrollo del mismo, ya que, a futuro será posible implementarle un sistema que permita variar su forma de movilidad, haciéndolo aún más valioso y efectivo al momento no solo de desplazarse en terrenos irregulares, sino en entornos desconocidos.
- Se debe realizar el cambio de cada uno de los servomotores para giro utilizados en el vehículo, ya que estos no dieron los resultados esperados. Se recomienda utilizar motorreductores con encoder, implementando un control de giro para establecer los ángulos deseados.
- Sería de gran utilidad diseñar un componente adicional en el sistema de siembra como una rejilla, para hacer más efectivo este proceso, como también, reducir los huecos de la estructura en los que se posan

las semillas, esto es, brindando una mejor ubicación dentro de la cuadrícula de la placa y que estas finalmente puedan tener una posición fija y una salida de escape segura por la tolva; evitando que se queden atascadas en el camino, aumentando la tasa de efectividad de la siembra.

- Se puede agregar un componente que se instale de forma similar que la tolva en la función de siembra, el cual ayudará a complementar esta función de siembra, cubriendo el hueco que se abrió previamente para colocar la semilla.
- Finalmente, otra mejora planteada es, copiar el mecanismo usado en uno de los laterales del vehículo para mantener la placa horizontal, al otro costado, tomando en cuenta el mismo motor para los dos costados; esto con el objetivo de evitar mayor consumo del motor que está realizando esta función y dar más estabilidad en el control de esta parte.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (mayo de 2015). DANE. Recuperado el 5 de agosto de 2019, de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos_may_2015.pdf
- ABC. (21 de julio de 2013). ABC. Recuperado el 5 de agosto de 2019, de <https://www.abc.es/tecnologia/informatica-hardware/20130716/abci-raspberry-como-201307151936.html>
- ARDUINO. (s.f.). ARDUINO. Recuperado el 3 de agosto de 2019, de <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- Barrientos, A., Peñon, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (1997). Fundamentos de Robótica. Madrid, España: McGRAW W-HILL. Recuperado el 5 de agosto de 2019
- Cambridge University press. (s.f.). Cambridge Dictionary. Recuperado el 6 de agosto de 2019, de <https://dictionary.cambridge.org/es/diccionario/ingles/rover>
- Definición. (s.f.). Recuperado el 3 de septiembre de 2019, de <https://definicion.de/bluetooth/>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2001). DANE. Recuperado el 2 de agosto de 2019, de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/Cebolla_Boyaca_Reg_Laguna_Tota.pdf
- Ginsberg, J. H. (1995). Advanced Engineering Dynamics. Cambridge: Cambridge University Press. Recuperado el 6 de agosto de 2019
- Massachusetts Institute of Technology. (s.f.). AppInventor. Recuperado el 2 de septiembre de 2019, de <https://appinventor.mit.edu/about-us>

- MBA EUROGROUP. (s.f.). Rodamiento Bulnes. Recuperado el 10 de septiembre de 2019, de <http://www.rodamientosbulnes.com/resources/catalogs/mba/bulnes-mba-rodamientos.pdf>
- N., N. (s.f.). The SOLERO Rover. Springer Tracts in Advanced Robotics, 43. Obtenido de https://link-springer-com.aure.unab.edu.co/content/pdf/10.1007%2F978-3-540-78287-2_2.pdf
- Pinzón Ramírez, Hernán; Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica); Asociación Hortifrutícola de Colombia (Asohofrucol). (agosto de 2004). Conecta Rural. Recuperado el 5 de 08 de 2019, de https://repository.agrosavia.co/bitstream/20.500.12324/2121/1/41284_27373.pdf
- Quezada Cepeda, D. P. (abril de 2014). Repositorio Institucional de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Recuperado el agosto de 2019, de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/8169>
- Real Academia Española. (octubre de 2014). Diccionario de la Lengua Española. Recuperado el 12 de marzo de 2020, de <https://dle.rae.es/surco>
- Real Academia Española. (s.f.). Diccionario de la Real Academia Española. Recuperado el 7 de agosto de 2019, de <https://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=microprocesador>
- Schiele, A., Romstedt, J., Lee, C., Henkel, H., Bertrand, R., Klinkner, S., . . . Michaelis, H. (10 de junio de 2008). Nanokhod Exploration Rover. IEEE, 15, 96-107. Obtenido de <https://ieeexplore-ieee-org.aure.unab.edu.co/document/4539727>
- SIEMENS. (s.f.). SIEMENS. Recuperado el 3 de septiembre de 2019, de <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/finite-element-analysis-fea/13173>

- Muro, T., & O'Brien, J. (2004). TERRAMECHANICS Land Locomotions Mechanics. Tokyo: A. A. BALKEMA PUBLISHERS. Recuperado el 2 de diciembre de 2020

8. ANEXOS

8.1. MODELO MATEMÁTICO – NEWTON-EULER

En este apartado se encuentra la continuación del modelo matemático, el cual muestra el paso a paso para la obtención de algunas ecuaciones que no se explica durante el desarrollo del documento.

8.1.1. ÁNGULOS

Inicialmente daremos nombre a las variables a utilizar dentro del modelo matemático, iniciando con los ángulos absolutos, que son las posiciones angulares de los cuerpos con respecto al sistema anclado en tierra y luego los ángulos relativos que serán las posiciones angulares de un cuerpo con respecto a otro.

Ángulos absolutos:

$$\theta_P = \text{Theta placa}$$

$$\theta_A = \text{Theta rocker}$$

$$\theta_B = \text{Theta bogie}$$

$$\theta_C = \text{Theta C de nombre "C"}$$

$$\theta_E = \text{Theta C de nombre "E"}$$

$$\theta_G = \text{Theta C de nombre "G"}$$

Ángulos relativos:

$$\theta_1 = \theta_P - \theta_A$$

$$\theta_2 = \theta_A - \theta_B$$

$$\theta_3 = \theta_C - \theta_B$$

$$\theta_4 = \theta_E - \theta_B$$

$$\theta_5 = \theta_G - \theta_A$$

$$\theta_6 = \theta_D - \theta_C$$

$$\theta_7 = \theta_F - \theta_E$$

$$\theta_8 = \theta_H - \theta_G$$

8.1.2. VELOCIDADES

En esta parte de los anexos se encontrarán todas las ecuaciones correspondientes a las velocidades y sus respectivos procedimientos para llegar a ellas. Se inicia con la velocidad del punto P0, la cual es la velocidad de referencia primaria de la cual dependerán todas las demás; se toma dicha velocidad como un parámetro de entrada para el modelo matemático, por tal motivo se encuentra parametrizada en la siguiente ecuación:

$${}^N\vec{V}^{P_0} = V_x \hat{x} + V_y \hat{y} + V_z \hat{z}$$

Ecuación 101 Velocidad del punto 0 vista desde el sistema newtoniano en base P.

- **Velocidad del punto P1**

Para hallar la velocidad del punto P1, se utiliza la ecuación 3 del documento:

$${}^N\vec{V}^{P_1} = {}^N\vec{V}^{P_0} + A\vec{V}^{P_0} + {}^N\omega^{RA} \times \vec{r}_{P_0P_1}$$

Ecuación 102 Uso de la ecuación 3 para hallar la velocidad de P1.

El procedimiento para hallar la velocidad del punto P1 con respecto al punto P0, consiste en hallar los tres términos que componen a la ecuación anterior, el primer término es la velocidad del punto de referencia, es decir, la velocidad que se conoce para hallar la que se desconoce.

El segundo término de la ecuación se refiere a las velocidades relativas entre el punto P1 y el punto P0, que en este caso tendrá el valor de cero, debido a

que al encontrarse en el mismo cuerpo y dicho cuerpo ser rígido, es decir, no tiene movimiento relativo en sus partes, no existirá dicha velocidad entre los puntos anteriormente mencionados. Así mismo este análisis se repite a lo largo del documento por lo cual será omitido de aquí en adelante:

$${}^A\vec{V}_{P_0}^{\frac{P_1}{P_0}} = \frac{Ad}{dt} (\vec{r}_{P_0P_1}) \rightarrow {}^A\vec{V}_{P_0}^{\frac{P_1}{P_0}} = \frac{Ad}{dt} \left(\frac{lp}{2} \hat{a} \right) \rightarrow {}^A\vec{V}_{P_0}^{\frac{P_1}{P_0}} = 0$$

Ecuación 103 Resultado del segundo término de la ecuación 88.

El tercer término es la velocidad angular del cuerpo RA en el sistema de A, que primero se toma desde el sistema de P y luego, se transforma al sistema de A.

$${}^N\omega^{RA} = \dot{\theta}_A \hat{p} \rightarrow {}^N\omega^{RA} = \dot{\theta}_A \hat{a}$$

Ecuación 104 Velocidad angular del cuerpo RA vista desde el sistema newtoniano.

Con el valor de la velocidad angular y el vector posición que fue anteriormente hallado, se realiza el productor cruz entre estos valores y como están en la misma coordenada (\hat{a}), se cancelan dando como resultado un valor igual a cero:

$${}^N\omega^{RA} \times \vec{r}_{P_0P_1} = \dot{\theta}_A \hat{a} \times \frac{lp}{2} \hat{a} \rightarrow {}^N\omega^{RA} \times \vec{r}_{P_0P_1} = 0$$

Ecuación 105 Resultado del tercer término de la ecuación 88.

Ya teniendo los valores de cada uno de los tres términos, se reemplazan en la ecuación 88, como se evidencia en la siguiente ecuación:

$${}^N\vec{V}_{P_1} = V_x \hat{p} + V_y \hat{p} + V_z \hat{p} + 0 + 0$$

Ecuación 106 Velocidad del punto P1 vista desde el sistema newtoniano en base P.

Luego, se realiza la transformación de este punto al sistema de A:

$${}^N\vec{V}_{P_1} = V_x (C_1 \hat{a} - S_1 \hat{a}) + V_y (S_1 \hat{a} + C_1 \hat{a}) + V_z \hat{a}$$

Ecuación 107 Velocidad del punto P1 vista desde el sistema newtoniano en base A.

Por último, se realizan las respectivas multiplicaciones, sumas y restas, que darán como resultado la velocidad del punto P1 ya organizada:

$${}^N\vec{V}^{P_1} = (V_x C_1 + V_y S_1)\hat{a}_x + (-V_x S_1 + V_y C_1)\hat{a}_y + V_z \hat{a}_z$$

Ecuación 108 Velocidad del punto P1 vista desde el sistema newtoniano en base A – Ordenada.

- **Velocidad del punto P2**

Con la velocidad del punto P1, se procede a hallar la velocidad del punto P2, esto es, omitiendo ya el segundo término como se había mencionado anteriormente que será la velocidad relativa entre los puntos P2 y P1, cuyo resultado será cero:

$${}^N\vec{V}^{P_2} = {}^N\vec{V}^{P_1} + {}^N\omega^{RA} \times \vec{r}_{P_1 P_2}$$

Ecuación 109 Uso de la ecuación 3 para hallar la velocidad de P2.

El tercer término de la ecuación inicial que ahora pasa a ser el segundo, es un producto cruz muy similar al del proceso anterior solo que, en este, el resultado ya no es cero:

$${}^N\omega^{RA} \times \vec{r}_{P_1 P_2} = \theta \hat{a}_z \times \frac{lr}{2} (\hat{a}_x - h\hat{a}_y)$$

Ecuación 110 Resultado del tercer término de la ecuación 95.

$${}^N\omega^{RA} \times \vec{r}_{P_1 P_2} = \frac{lr}{2} (\theta \hat{a}_y + h\theta \hat{a}_x)$$

Ecuación 111 Resultado del tercer término de la ecuación 95 – Organizada.

Con la solución de los términos anteriores, se presenta la ecuación de la velocidad del punto P2 organizada:

$${}^N\vec{V}^{P_2} = (V_x C_1 + V_y S_1 + h\dot{\theta})\hat{a}_x + (V_x S_1 - V_y C_1 + \frac{lr}{2} \dot{\theta})\hat{a}_y + V_z \hat{a}_z$$

Ecuación 112 Velocidad del punto P2 vista desde el sistema newtoniano en base A – Organizada.

- **Velocidad del punto P5**

Para hallar la velocidad del punto P5, se utiliza también la velocidad de P1 y además se toman como referencias los procedimientos anteriores que son muy afines:

$${}^N\vec{V}^{P_5} = {}^N\vec{V}^{P_1} + {}^N\omega^{RA} \times \vec{r}_{P_1P_5}$$

Ecuación 113 Uso de la ecuación 3 para hallar la velocidad de P5.

$${}^N\omega^{RA} \times \vec{r}_{P_1P_5} = \theta \hat{a}_z \times \left(\frac{lr}{2} \hat{a}_x - h\hat{a}_y \right)$$

Ecuación 114 Resultado del tercer término de la ecuación 99.

$${}^N\omega^{RA} \times \vec{r}_{P_1P_5} = -\frac{lr}{2} \theta \hat{a}_y + h\theta \hat{a}_x$$

Ecuación 115 Resultado del tercer término de la ecuación 99 – Organizada.

$${}^N\vec{V}^{P_5} = (V_{x1} C_1 + V_{y1} S_1 + h\theta \hat{a}_x) \hat{a}_x + (V_{y1} C_1 - V_{x1} S_1 - \frac{lr}{2} \theta) \hat{a}_y + V_{z1} \hat{a}_z$$

Ecuación 116 Velocidad del punto P5 vista desde el sistema newtoniano en base A – Organizada.

En este punto del procedimiento de hallar todas las velocidades, se transforma el punto P2 previamente en el sistema de A, al sistema de B para hallar las velocidades de los puntos 3 y 4 que se encuentran en el cuerpo RB y el sistema de B.

$${}^N\vec{V}^{P_2} = (V_x C_1 + V_y S_1 + h\theta \hat{a}_x) (C_2 \hat{b}_x + S_2 \hat{b}_y) + (V_{y1} C_1 - V_{x1} S_1 + \frac{lr}{2} \theta) (S_2 \hat{b}_x + C_2 \hat{b}_y) + V_{z1} \hat{b}_z$$

Ecuación 117 Velocidad del punto P2 vista desde el sistema newtoniano en base B.

$${}^N\vec{V}^{P_2} = \left[(V_{x1} C_1 + V_{y1} S_1 + h\theta \hat{a}_x) C_2 + (V_{y1} C_1 - V_{x1} S_1 + \frac{lr}{2} \theta) S_2 \right] \hat{b}_x + \left[(V_{y1} C_1 - V_{x1} S_1 + \frac{lr}{2} \theta) C_2 - (V_{x1} C_1 + V_{y1} S_1 + h\theta \hat{a}_x) S_2 \right] \hat{b}_y + V_{z1} \hat{b}_z$$

Ecuación 118 Velocidad del punto P2 vista desde el sistema newtoniano en base B – Organizada.

- **Velocidad de punto P3**

Con la velocidad del punto P2 ya transformada al sistema de B, se halló el punto P3 siguiendo el procedimiento en donde se halló P1 y P2 en el sistema de A:

$${}^N\vec{V}^{P_3} = {}^N\vec{V}^{P_2} + {}^N\omega^{RB} \times \vec{r}_{P_2P_3}$$

Ecuación 119 Uso de la ecuación 3 para hallar la velocidad de P3.

$${}^N\omega^{RB} \times \vec{r}_{P_2P_3} = \dot{\theta} \hat{b}_z \times \frac{lb}{2} \hat{b}_x - \dot{E} \hat{b}_z$$

Ecuación 120 Resultado del segundo término de la ecuación 105.

$${}^N\omega^{RB} \times \vec{r}_{P_2P_3} = -\frac{lb}{2} \dot{\theta} \hat{b}_y$$

Ecuación 121 Resultado del segundo término de la ecuación 105 – Organizada.

$${}^N\vec{V}^{P_3} = \left[(V_{x1} + V_{y1} + h\theta_A + (V_C - V_S + \frac{lr}{2} \dot{\theta}) S) \hat{b}_x + (V_C - V_S + \frac{lr}{2} \dot{\theta}) C - (V_C + V_S + h\theta_A - \frac{lb}{2} \dot{\theta}) \hat{b}_y + V \hat{b}_z \right]$$

Ecuación 122 Velocidad del punto P3 vista desde el sistema newtoniano en base C – Organizada.

- **Velocidad del punto P4**

Para hallar la velocidad del punto P4 es seguir el mismo procedimiento para hallar la velocidad de P3.

$${}^N\vec{V}^{P_4} = {}^N\vec{V}^{P_2} + {}^N\omega^{RB} \times \vec{r}_{P_2P_4}$$

Ecuación 123 Uso de la ecuación 3 para hallar la velocidad de P3.

$${}^N\omega^{RB} \underset{P_2P_4}{x} \overset{\text{*****}}{\vec{r}} = \dot{\theta} \hat{b}_z \frac{lb}{2} \hat{b}_x + \dot{E} \hat{b}_z$$

Ecuación 124 Resultado del segundo término de la ecuación 109.

$${}^N\omega^{RB} \underset{P_2P_4}{x} \overset{\text{*****}}{\vec{r}} = \frac{lb}{2} \dot{\theta} \hat{b}_y$$

Ecuación 125 Resultado del segundo término de la ecuación 109 – Organizada.

$$\begin{aligned} {}^N\vec{V}^{P_4} = & \left[(V_{x1} + V_{y1} S + h\theta \mathcal{C} + (V_{y1} C - V_{x1} S + \frac{lr}{2} \dot{\theta}) S) \hat{b} \right. \\ & + \left[(V_{y1} C - V_{x1} S + \frac{lr}{2} \dot{\theta}) C - (V_{x1} C + V_{y1} S + h\theta \mathcal{S} + \frac{lb}{2} \dot{\theta}) \hat{b} \right. \\ & \left. \left. + V_z \hat{b}_z \right] \right. \end{aligned}$$

Ecuación 126 Velocidad del punto P4 vista desde el sistema newtoniano en base B – Organizada.

- **Velocidad del punto P6**

Al igual que con el punto P2, se transforma el punto P4, pero esa vez al sistema de C para hallar posteriormente el punto P6.

$$\begin{aligned} {}^N\vec{V}^{P_4} = & \left[(V_{x1} + V_{y1} S + h\theta \mathcal{C} + (V_{y1} C - V_{x1} S + \frac{lr}{2} \dot{\theta}) S) (C \hat{c}_x + S \hat{c}_y) \right. \\ & + \left[(V_{y1} C - V_{x1} S + \frac{lr}{2} \dot{\theta}) C - (V_{x1} C + V_{y1} S + h\theta \mathcal{S} + \frac{lb}{2} \dot{\theta}) \hat{b} \right] \hat{c}_y \\ & \left. + V_z (-S_3 \hat{c}_x + C_3 \hat{c}_y) \right. \end{aligned}$$

Ecuación 127 Velocidad del punto P4 vista desde el sistema newtoniano en base C.

$$\begin{aligned} {}^N\vec{V}^{P_4} = & \left\{ \left[(V_{x1} + V_{y1} S + h\theta \mathcal{C} + (V_{y1} C - V_{x1} S + \frac{lr}{2} \dot{\theta}) S) C - V_z \right] \hat{c}_x \right. \\ & + \left[(V_{y1} C - V_{x1} S + \frac{lr}{2} \dot{\theta}) C - (V_{x1} C + V_{y1} S + h\theta \mathcal{S} + \frac{lb}{2} \dot{\theta}) \hat{b} \right] \hat{c}_y \\ & + \left\{ (V_{x1} C + V_{y1} S + h\theta \mathcal{C} + (V_{y1} C - V_{x1} S + \frac{lr}{2} \dot{\theta}) S) S \right. \\ & \left. \left. + V_z C_3 \right\} \hat{c}_z \right. \end{aligned}$$

Ecuación 128 Velocidad del punto P4 vista desde el sistema newtoniano en base C – Organizada.

Se procede a usar la ecuación 5 la para hallar la velocidad del punto P6 usando como referencia el punto P4:

$${}^N\vec{V}^{P_6} = {}^N\vec{V}^{P_4} + {}^N\omega^{RC} \times \vec{r}_{P_4P_6}$$

Ecuación 129 Uso de la ecuación 3 para hallar la velocidad de P3.

$${}^N\omega^{RC} \times \vec{r}_{P_4P_6} = \dot{\theta}_C \hat{c}_y \times \vec{r} - \dot{h}_C \hat{c}_y = 0$$

Ecuación 130 Resultado del segundo término de la ecuación 115.

Con lo anterior realizado se llega a la conclusión de que:

$${}^N\vec{V}^{P_6} = {}^N\vec{V}^{P_4}$$

Ecuación 131 Velocidad del punto P6 vista desde el sistema newtoniano en base C.

- **Velocidad de los puntos P6, P7 y P8**

El procedimiento aplicado a hallar la velocidad del punto P6, sirve de referencia para hallar las velocidades de los puntos P7 y P8, teniendo como referencia los puntos P3 y P5, y que están a las piezas C del mecanismo (Cuerpos RD, RF y RH) que funcionan muy similarmente.

Entonces se transforman los puntos P3 y P5 a los sistemas de E y G respectivamente, para hallar las velocidades de los puntos P7 y P8.

Trasformación de la velocidad del punto P3 al sistema de E:

$$\begin{aligned} {}^N\vec{V}^{P_3} = & \left[\begin{matrix} V_{x1} & + & V_{y1} & S & + & h\theta & \hat{c}_y & + & (V_C & - & V_S & + & \frac{lr}{2} & \theta &) & S \end{matrix} \right] \left(\hat{c}_x & + & S\hat{c}_y \right) \\ & + \left[\begin{matrix} (V_C & - & V_S & + & \frac{lr}{2} & \theta &) & C & - & (V_C & + & V_S & + & h\theta &) & \hat{c}_y & - & \frac{\theta}{2} \end{matrix} \right] \hat{c}_x \\ & + V_z(-S_4\hat{e}_x + C_4\hat{e}_y) \end{aligned}$$

Ecuación 132 Velocidad del punto P3 vista desde el sistema newtoniano en base E.

$$\begin{aligned}
{}^N\vec{v}^{P_3} = & \{ [(V_{x1} + V_{y1} + h\theta_A)C_2 + (V_{y1}C_3 - V_{x1}S_3 + \frac{lr}{2} \theta_A)S_4 - V_{z4}]e_x \\
& + [(V_{y1}C_3 - V_{x1}S_3 + \frac{lr}{2} \theta_A)C_2 - (V_{x1}C_3 + V_{y1}S_3 + h\theta_A)S_2 - \frac{lr}{2} \theta_B]e_y \\
& + [(V_{x1}C_3 + V_{y1}S_3 + h\theta_A)C_2 + (V_{y1}C_3 - V_{x1}S_3 + \frac{lr}{2} \theta_A)S_4]S_5 \\
& + V_{z4}e_z \}
\end{aligned}$$

Ecuación 133 Velocidad del punto P3 vista desde el sistema newtoniano en base E – Organizada.

Transformación de la velocidad del punto P5 al sistema de G:

$$\begin{aligned}
{}^N\vec{v}^{P_5} = & (V_{x1}C_1 + V_{y1}S_1 + h\theta_A)(C_5\hat{g}_x + S_5\hat{g}_z) + (V_{y1}C_1 - V_{x1}S_1 - \frac{lr}{2} \theta_A)\hat{g}_y \\
& + V_z(-S_5\hat{g}_x + C_5\hat{g}_z)
\end{aligned}$$

Ecuación 134 Velocidad del punto P5 vista desde el sistema newtoniano en base G.

$$\begin{aligned}
{}^N\vec{v}^{P_5} = & [(V_xC_1 + V_yS_1 + h\theta_A)C_5 - V_zS_5]\hat{g}_x + (C_5\hat{g}_z + S_5\hat{g}_x) \\
& + [V_{y1}C_1 - V_{x1}S_1 - \frac{lr}{2} \theta_A]\hat{g}_y + [(V_{x1}C_1 + V_{y1}S_1 + h\theta_A)S_5 + V_{z5}]\hat{g}_z
\end{aligned}$$

Ecuación 135 Velocidad del punto P5 vista desde el sistema newtoniano en base G – Organizada.

De las ecuaciones anteriores, se concluye que:

$${}^N\vec{v}^{P_7} = {}^N\vec{v}^{P_3}$$

Ecuación 136 Velocidad del punto P7 vista desde el sistema newtoniano en base E.

$${}^N\vec{v}^{P_8} = {}^N\vec{v}^{P_5}$$

Ecuación 137 Velocidad del punto P8 vista desde el sistema newtoniano en base G.

Finalmente, se realiza la transformación de los puntos P6, P7 y P8 que están en los sistemas de C, E y G, a los sistemas de D, F y H. Esto con el fin de tener las velocidades en los sistemas de referencia que están en las piezas C.

$$\begin{aligned}
{}^N\vec{V}^{P_6} = & \{ [(V_{x1} + VS_{y1} + h\theta_A)C_2 + (VC_{y1} - VS_{x1} + \frac{lr}{2}\theta_A)S_3 - VS_z]C_6 - S_6 \hat{d}_x \\
& + \{ (VC_{y1} - VS_{x1} + \frac{lr}{2}\theta_A)C_2 - (VC_{x1} + VS_{y1} + h\theta_A)S_3 \\
& + \frac{lb}{2}\dot{\theta}_B \} S_6 \hat{d}_x + C_6 \hat{d}_y \\
& + \{ [(VC_{x1} + VS_{y1} + h\theta_A)C_2 + (VC_{y1} - VS_{x1} + \frac{lr}{2}\theta_A)S_3]S_3 \\
& + V_z C_3 \} \hat{d}_z
\end{aligned}$$

Ecuación 138 Velocidad del punto P6 vista desde el sistema newtoniano en base D.

$$\begin{aligned}
{}^N\vec{V}^{P_6} = & \{ \{ [(V_{x1} + VS_{y1} + h\theta_A)C_2 + (VC_{y1} - VS_{x1} + \frac{lr}{2}\theta_A)S_3]C_6 - VS_z \} C_6 \\
& + \{ (VC_{y1} - VS_{x1} + \frac{lr}{2}\theta_A)C_2 - (VC_{x1} + VS_{y1} + h\theta_A)S_3 \\
& + \frac{lb}{2}\dot{\theta}_B \} S_6 \} \hat{d}_x \\
& + \{ \{ (VC_{y1} - VS_{x1} + \frac{lr}{2}\theta_A)C_2 - (VC_{x1} + VS_{y1} + h\theta_A)S_3 + \frac{lb}{2}\dot{\theta}_B \} C_6 \\
& - \{ [(VC_{x1} + VS_{y1} + h\theta_A)C_2 + (VC_{y1} - VS_{x1} + \frac{lr}{2}\theta_A)S_3]C_3 \\
& - V_z S_3 \} S_6 \} \hat{d}_y \\
& + \{ [(VC_{x1} + VS_{y1} + h\theta_A)C_2 + (VC_{y1} - VS_{x1} + \frac{lr}{2}\theta_A)S_3]S_3 \\
& + V_z C_3 \} \hat{d}_z
\end{aligned}$$

Ecuación 139 Velocidad del punto P6 vista desde el sistema newtoniano en base D – Organizada.

$$\begin{aligned}
{}^N\vec{V}^{P7} = & \{[(V_{x1} + V_{y1} + h\theta_A)C_2 + (V_{y1} - V_{x1} + \frac{lr}{2}\theta_A)S_2]C_4 - V_{z4}\}\{C_7\hat{f}_x \\
& - S_7\hat{f}_y\} \\
& + \{(V_{y1} - V_{x1} + \frac{lr}{2}\theta_A)C_2 - (V_{x1} + V_{y1} + h\theta_A)S_2 \\
& - \frac{lb}{2}\dot{\theta}_B\}\{S_7\hat{f}_x + C_7\hat{f}_y\} \\
& + \{[(V_{x1} + V_{y1} + h\theta_A)C_2 + (V_{y1} - V_{x1} + \frac{lr}{2}\theta_A)S_2]S_4 \\
& + V_{z4}\}\hat{f}_z
\end{aligned}$$

Ecuación 140 Velocidad del punto P7 vista desde el sistema newtoniano en base F.

$$\begin{aligned}
{}^N\vec{V}^{P7} = & (\{[(V_{x1} + V_{y1} + h\theta_A)C_2 + (V_{y1} - V_{x1} + \frac{lr}{2}\theta_A)S_2]C_4 - V_{z4}\}C_7 \\
& + \{(V_{y1} - V_{x1} + \frac{lr}{2}\theta_A)C_2 - (V_{x1} + V_{y1} + h\theta_A)S_2 \\
& + \frac{lb}{2}\dot{\theta}_B\}S_7)\hat{f}_x \\
& + (\{(V_{y1} - V_{x1} + \frac{lr}{2}\theta_A)C_2 - (V_{x1} + V_{y1} + h\theta_A)S_2 - \frac{lb}{2}\dot{\theta}_B\}C_7 \\
& - \{[(V_{x1} + V_{y1} + h\theta_A)C_2 + (V_{y1} - V_{x1} + \frac{lr}{2}\theta_A)S_2]C_4 \\
& - V_{z4}\}S_7)\hat{f}_y \\
& + \{[(V_{x1} + V_{y1} + h\theta_A)C_2 + (V_{y1} - V_{x1} + \frac{lr}{2}\theta_A)S_2]S_4 \\
& + V_{z4}\}\hat{f}_z
\end{aligned}$$

Ecuación 141 Velocidad del punto P7 vista desde el sistema newtoniano en base F – Organizada.

$$\begin{aligned}
{}^N\vec{V}^{P8} = & [(V_x C_1 + V_y S_1 + h\dot{\theta}_A)C_5 - \frac{lr}{2}V_z S_5][C_8\hat{h}_x + S_8\hat{h}_y \\
& + [V_{y1} - V_{x1} - \frac{lr}{2}\theta_A][S_8\hat{h}_x + C_8\hat{h}_y \\
& + [(V_x C_1 + V_y S_1 + h\dot{\theta}_A)S_5 + V_z C_5]\hat{h}_z
\end{aligned}$$

Ecuación 142 Velocidad del punto P8 vista desde el sistema newtoniano en base H.

$$\begin{aligned}
{}^N\vec{V}^{P_8} = & \{[(V_{x1}C_1 + V_{y1}S_1 + h\dot{\theta}_A)C_5 - V_{z5}S_5]C_8 + [V_{y1}C_1 - V_{x1}S_1 - \frac{lr}{2}\dot{\theta}_A]S_8\}\hat{h}_x \\
& + \{[V_{y1}C_1 - V_{x1}S_1 - \frac{lr}{2}\dot{\theta}_A]C_8 \\
& - [(V_{x1}C_1 + V_{y1}S_1 + h\dot{\theta}_A)C_5 - V_{z5}S_5]S_8\}\hat{h}_y \\
& + [(V_{x1}C_1 + V_{y1}S_1 + h\dot{\theta}_A)S_5 + V_{z5}C_5]\hat{h}_z
\end{aligned}$$

Ecuación 143 Velocidad del punto P8 vista desde el sistema newtoniano en base H-Organizada.

8.1.3. ACELERACIONES

En este apartado de los anexos, se mostrará todas las ecuaciones y el procedimiento realizado para hallar las aceleraciones de cada punto. Inicialmente se halla la aceleración de P0 y luego las demás:

$${}^N\vec{a}^{P_0} = a_x\hat{x} + a_y\hat{y} + a_z\hat{z}$$

Ecuación 144 Aceleración del punto P0 vista desde el sistema newtoniano en base P.

- **Aceleración del punto P1**

Se tiene como ecuación principal la ecuación 4 mostrada en el marco teórico del documento:

$${}^N\vec{a}^{P_1} = {}^N\vec{a}^{P_0} + {}^A\vec{a}^{P_1} + {}^N\vec{\alpha}^P \times \vec{r}_{P_0P_1} + {}^N\vec{\omega}^P \times ({}^N\vec{\omega}^P \times \vec{r}_{P_0P_1}) + 2{}^N\vec{\omega}^P \times {}^A\vec{V}^{P_1}$$

Ecuación 145 Uso de la ecuación 4 para hallar la aceleración del punto P1.

El segundo término de la ecuación es la aceleración relativa entre P1 y P0, la cual es cero por están en el mismo sistema de referencia:

$${}^A\vec{a}^{P_1} = \frac{d}{dt} ({}^A\vec{V}^{P_1}) \rightarrow {}^A\vec{a}^{P_1} = \frac{d}{dt} (0) \rightarrow {}^A\vec{a}^{P_1} = 0$$

Ecuación 146 Resultado del segundo término de la ecuación 131.

Para hallar el resultado del tercer término, primero se halla la aceleración angular del cuerpo P en el sistema de P, luego se transforma al sistema de

A y se realiza el producto cruz entre dos valores, pero al tener la misma coordenada (\hat{q}), estas dan como resultado cero:

$${}^N\vec{\alpha}^P = \ddot{\theta}_p \hat{p} \rightarrow {}^N\vec{\alpha}^P = \ddot{\theta}_p \hat{q}$$

Ecuación 147 Aceleración angular vista desde el sistema newtoniano.

$${}^N\vec{\alpha}^P \times \vec{r}_{P_0P_1} = \theta \hat{a}_x \times \frac{l_p}{2} \hat{a}_z$$

Ecuación 148 Resultado del tercer término de la ecuación 131.

Para el cuarto y quinto término, por los cálculos realizados anteriormente en las velocidades se concluye que ambos dan como resultado un valor de cero:

$${}^N\vec{\omega}^P \times ({}^N\vec{\omega}^P \times \vec{r}_{P_0P_1}) = \ddot{\theta}_p \hat{p}_x(0) \rightarrow {}^N\vec{\omega}^P \times ({}^N\vec{\omega}^P \times \vec{r}_{P_0P_1}) = 0$$

Ecuación 149 Resultado del cuarto término de la ecuación 131.

$$2 {}^N\vec{\omega}^P \times \vec{A}\vec{V}_{P_0}^{P_1} = 2\theta \hat{p}_x(0) \rightarrow 2 {}^N\vec{\omega}^P \times \vec{A}\vec{V}_{P_0}^{P_1} = 0$$

Ecuación 150 Resultado del quinto término de la ecuación 131.

Con los valores hallados de cada término, se procede a reemplazar en la ecuación inicial para hallar la aceleración del punto P1:

$${}^N\vec{a}^{P_1} = a_x \hat{p} + a_y \hat{p} + a_z \hat{p} + 0 + 0 + 0 + 0$$

Ecuación 151 Aceleración del punto P1 vista desde el sistema newtoniano en base P.

Luego se transforma el resultado al sistema de A:

$${}^N\vec{a}^{P_1} = a_x (C_1 \hat{q} - S_1 \hat{q}) + a_y (S_1 \hat{q} + C_1 \hat{q}) + a_z \hat{q}$$

Ecuación 152 Aceleración del punto P1 vista desde el sistema newtoniano en base A.

Por último, se organiza la ecuación quedando de la siguiente forma:

$${}^N\vec{a}^{P_1} = (a_x C_1 + a_y S_1) \hat{q} + (-a_x S_1 + a_y C_1) \hat{q} + a_z \hat{q}$$

Ecuación 153 Aceleración del punto P1 vista desde el sistema newtoniano en base A – Organizada.

- **Aceleración del punto P2**

Ya con el punto P1 hallado, es posible hallar P2 utilizando también con la ecuación 4 del documento. En esta ecuación se omitieron dos términos ya que sus resultados tendrán el valor de cero por lo que de aquí en adelante no se escribirán en las ecuaciones generales:

$${}^N\vec{a}^{P2} = {}^N\vec{a}^{P1} + {}^N\vec{\alpha}^{RA} \times \vec{r}_{P_1 P_2} + {}^N\vec{\omega}^{RA} \times ({}^N\vec{\omega}^{RA} \times \vec{r}_{P_1 P_2})$$

Ecuación 154 Uso de la ecuación 4 para hallar la aceleración del punto P2.

Ya se tiene la información necesaria para hallar los otros dos términos restantes y solo faltaría realizar los productos cruz de cada uno.

$$({}^N\vec{\alpha}^{RA} \times \vec{r}_{P_1 P_2}) = \theta \hat{a}_z \left(\frac{lr}{2} \hat{a}_x - h\hat{a}_y \right)$$

Ecuación 155 Resultado del segundo término de la ecuación 140.

$$({}^N\vec{\alpha}^{RA} \times \vec{r}_{P_1 P_2}) = \frac{lr}{2} \theta \hat{a}_y + h\theta \hat{a}_x$$

Ecuación 156 Resultado del segundo término de la ecuación 140 – Organizada.

$${}^N\vec{\omega}^{RA} \times ({}^N\vec{\omega}^{RA} \times \vec{r}_{P_1 P_2}) = \theta \hat{a}_z \left(\frac{lr}{2} \hat{a}_y + h\theta \hat{a}_x \right)$$

Ecuación 157 Resultado del tercer término de la ecuación 140.

$${}^N\vec{\omega}^{RA} \times ({}^N\vec{\omega}^{RA} \times \vec{r}_{P_1 P_2}) = -\frac{lr}{2} \theta^2 \hat{a}_x + h\theta^2 \hat{a}_y$$

Ecuación 158 Resultado del tercer término de la ecuación 140 – Organizada.

Luego de hallar los resultados de cada término, se procede a reemplazarlos en la ecuación y se realizan las respectivas operaciones para organizarla.

$${}^N\vec{a}^{P2} = (a_{x1} C_y + a_{y1} S_x) \hat{a}_x + (-a_{x1} S_y + a_{y1} C_x) \hat{a}_y + a_{z1} \hat{a}_z + \frac{lr}{2} \theta \hat{a}_y + h\theta \hat{a}_x + (-\frac{lr}{2} \theta^2 \hat{a}_x + h\theta^2 \hat{a}_y)$$

Ecuación 159 Aceleración del punto P2 vista desde el sistema newtoniano en base A.

$${}^N\vec{a}^{P_2} = \left[a_{x1} C + a_{y1} S + h\theta - \frac{lr}{2} \theta_A \right] \hat{e}_A + \left[-a_x S_1 + a_y C_1 + \frac{lr}{2} \theta_A + h \theta_A^2 \right] \hat{e}_y + a_z \hat{e}_z$$

Ecuación 160 Aceleración del punto P2 vista desde el sistema newtoniano en base A – Organizada.

- **Aceleración del punto P5**

El procedimiento para hallar la aceleración del punto P5 es muy similar a los puntos P1 y P2. Por eso siguiendo esos mismos pasos se llega a la solución que es la aceleración del punto 5:

$${}^N\vec{a}^{P_5} = {}^N\vec{a}^{P_1} + {}^N\vec{\alpha}^{RA} \times \vec{r}_{P_1 P_5} + {}^N\vec{\omega}^{RA} \times ({}^N\vec{\omega}^{RA} \times \vec{r}_{P_1 P_5})$$

Ecuación 161 Uso de la ecuación 4 para hallar la aceleración del punto P5.

Se halla la aceleración angular del cuerpo RA en el sistema de A, se realizan operaciones y luego se organizan los valores:

$$({}^N\vec{\alpha}^{RA} \times \vec{r}_{P_1 P_5}) = \theta_A \hat{e}_z \times \left(-\frac{lr}{2} \hat{e}_x - h \hat{e}_y \right)$$

Ecuación 162 Resultado del segundo término de la ecuación 147.

$$({}^N\vec{\alpha}^{RA} \times \vec{r}_{P_1 P_5}) = -\frac{lr}{2} \theta_A \hat{e}_y + h \theta_A \hat{e}_x$$

Ecuación 163 Resultado del segundo término de la ecuación 147 – Organizada.

Se halla la velocidad angular de RA en el sistema de A, se realizan operaciones también y luego se organizan los valores:

$${}^N\vec{\omega}^{RA} \times ({}^N\vec{\omega}^{RA} \times \vec{r}_{P_1 P_5}) = \theta_A \hat{e}_z \times \left(-\frac{lr}{2} \theta_A \hat{e}_y + h \theta_A \hat{e}_x \right)$$

Ecuación 164 Resultado del tercer término de la ecuación 147.

$${}^N\vec{\omega}^{RA} \times ({}^N\vec{\omega}^{RA} \times \vec{r}_{P_1 P_5}) = \frac{lr}{2} \theta_A^2 \hat{e}_x + h \theta_A^2 \hat{e}_y$$

Ecuación 165 Resultado del tercer término de la ecuación 147 – Organizada.

Los valores hallados se reemplazan en la ecuación general y luego se realizan las respectivas multiplicaciones y sumas para organizarla:

$${}^N\vec{a}^{P5} = (a_{x1} C + a_{y1} S) \hat{a}_x + (-a_{x1} S + a_{y1} C) \hat{a}_y + a_z \hat{a}_z - \frac{lr}{2} \theta_A \hat{a}_y + h \theta_A \hat{a}_x + \frac{lr}{2} \theta_A^2 \hat{a}_x + h \theta_A^2 \hat{a}_y$$

Ecuación 166 Aceleración del punto P5 vista desde el sistema newtoniano en base A.

$${}^N\vec{a}^{P5} = (a_{x1} C + a_{y1} S + h \theta_A + \frac{lr}{2} \theta_A^2) \hat{a}_x + (-a_{x1} S + a_{y1} C - \frac{lr}{2} \theta_A + h \theta_A^2) \hat{a}_y + a_z \hat{a}_z$$

Ecuación 167 Aceleración del punto P5 vista desde el sistema newtoniano en base A – Organizada.

Se procedió a transformar la aceleración de P2 en base A a dicha aceleración en base B, para posteriormente hallar la aceleración de los puntos P3 y P4:

$${}^N\vec{a}^{P2} = (a_{x1} C + a_{y1} S + h \theta_A + \frac{lr}{2} \theta_A^2) (C_2 b_x - S_2 b_y) + (a_{y1} C - a_{x1} S + \frac{lr}{2} \theta_A + h \theta_A^2) (S_2 b_x + C_2 b_y) + a_z b_z$$

Ecuación 168 Aceleración del punto P2 vista desde el sistema newtoniano en base B.

$${}^N\vec{a}^{P2} = [(a_{x1} C + a_{y1} S + h \theta_A + \frac{lr}{2} \theta_A^2) C_2 + (a_{y1} C - a_{x1} S + \frac{lr}{2} \theta_A + h \theta_A^2) S_2] b_x + [(a_{y1} C - a_{x1} S + \frac{lr}{2} \theta_A + h \theta_A^2) C_2 - (a_{x1} C + a_{y1} S + h \theta_A + \frac{lr}{2} \theta_A^2) S_2] b_y + a_z b_z$$

Ecuación 169 Aceleración del punto P2 vista desde el sistema newtoniano en base B – Organizada.

- **Aceleración del punto P3**

Con la aceleración del punto P2 transformada al sistema de B, se utiliza nuevamente la ecuación 4 para hallar la aceleración del punto P3:

$${}^N\vec{a}^{P3} = {}^N\vec{a}^{P2} + {}^N\vec{\alpha}^{RB} \times \vec{r}_{P_2P_3} + {}^N\vec{\omega}^{RB} \times ({}^N\vec{\omega}^{RB} \times \vec{r}_{P_2P_3})$$

Ecuación 170 Uso de la ecuación 4 para hallar la aceleración del punto P3.

Se halla la aceleración angular del cuerpo RB en el sistema de B, se hace el producto cruz con el vector posición previamente calculado, se realizan operaciones y luego se organizan los valores

$$({}^N\vec{\alpha}^{RB} \times \vec{r}_{P_2P_3}) = \theta \hat{b}_z \left(-\frac{lb}{2} \hat{b}_x + \hat{E}\hat{b}_z \right)$$

Ecuación 171 Resultado del segundo término de la ecuación 157

$$({}^N\vec{\alpha}^{RB} \times \vec{r}_{P_2P_3}) = -\frac{\ddot{\theta}_B lb}{2} \hat{b}_y$$

Ecuación 172 Resultado del segundo término de la ecuación 157 – Organizada.

También se halla la velocidad angular del cuerpo RB en el sistema de B, se realizan operaciones y ya se tendrían todos los términos para hallar la aceleración del punto P3.

$${}^N\vec{\omega}^{RB} \times ({}^N\vec{\omega}^{RB} \times \vec{r}_{P_2P_3}) = \theta \hat{b}_z \times \left(-\frac{\theta}{2} \frac{lb}{B} \hat{b}_y \right)$$

Ecuación 173 Resultado del tercer término de la ecuación 157.

$${}^N\vec{\omega}^{RB} \times ({}^N\vec{\omega}^{RB} \times \vec{r}_{P_2P_3}) = \frac{lb}{2} \theta \hat{b}_z \times \hat{b}_y$$

Ecuación 174 Resultado del tercer término de la ecuación 157 – Organizada.

Se reemplazan términos y se organizan los valores:

$$\begin{aligned}
{}^N\vec{a}^{P_3} = & \left[(a_{x1} C_1 + a_{y1} + h\theta_A + \frac{lr}{2} \theta_A^2) C_2 + (a_{y1} C_1 - a_{x1} S_1 + \frac{lr}{2} \theta_A^2) S_2 \right. \\
& \left. + lb \cdot \frac{\theta_B}{2} \right] \hat{b}_x \\
& + \left[(a_{y1} C_1 - a_{x1} S_1 + \frac{lr}{2} \theta_A^2) C_2 \right. \\
& \left. - (a_{x1} C_1 + a_{y1} S_1 + \frac{lr}{2} \theta_A^2) S_2 - \frac{\ddot{\theta}_B lb}{2} \right] \hat{b}_y + a_{yz} \hat{b}_z
\end{aligned}$$

Ecuación 175 Aceleración del punto P3 vista desde el sistema newtoniano en base B – Organizada.

- **Aceleración del punto P4**

Para hallar la aceleración de P4 es casi exactamente igual al procedimiento de hallar la aceleración de P3, dando como resultado:

$${}^N\vec{a}^{P_4} = {}^N\vec{a}^{P_2} + {}^N\vec{\alpha}^{RB} \times \vec{r}_{P_2 P_4} + {}^N\vec{\omega}^{RB} \times ({}^N\vec{\omega}^{RB} \times \vec{r}_{P_2 P_4})$$

Ecuación 176 Uso de la ecuación 4 para hallar la aceleración del punto P4.

$$({}^N\vec{\alpha}^{RB} \times \vec{r}_{P_2 P_4}) = \theta_B \hat{b}_z \times \left(\frac{lb}{2} \hat{b}_x + \hat{E} \hat{b}_z \right)$$

Ecuación 177 Resultado del segundo término de la ecuación 163.

$$({}^N\vec{\alpha}^{RB} \times \vec{r}_{P_2 P_4}) = \frac{\ddot{\theta}_B lb}{2} \hat{b}_y$$

Ecuación 178 Resultado del segundo término de la ecuación 163 – Organizada.

$${}^N\vec{\omega}^{RB} \times ({}^N\vec{\omega}^{RB} \times \vec{r}_{P_2 P_4}) = \theta_B \hat{b}_z \times \left(\frac{\theta_B lb}{2} \hat{b}_y \right)$$

Ecuación 179 Resultado del tercer término de la ecuación 163.

$${}^N\vec{\omega}^{RB} \times ({}^N\vec{\omega}^{RB} \times \vec{r}_{P_2 P_4}) = -\frac{lb}{2} \theta_B^2 \hat{b}_x$$

Ecuación 180 Resultado del tercer término de la ecuación 163 – Organizada.

$$\begin{aligned}
{}^N\vec{a}^{P4} = & \left[\left(a_{x1} C_1 + a_{y1} + h\theta + lr^2 \right. \right. \\
& \left. \left. - lb \cdot \frac{1}{2} \hat{\theta}_B \right) C_2 + \left(a_y C_1 - a_x S_1 + \frac{lr\theta + h^2}{2A} \hat{\theta}_A \right) S_2 \right. \\
& \left. + \left[\left(a_{y1} C_1 - a_{x1} S_1 + \frac{lr\theta + h^2}{2A} \hat{\theta}_A \right) C_2 \right. \right. \\
& \left. \left. - \left(a_{x1} C_1 + a_{y1} S_1 + \frac{\theta + lr^2}{hA} \hat{\theta}_B \right) S_2 + \frac{\ddot{\theta}_B lb}{2} \right] \hat{b}_x + a_{yz} \hat{b}_z \right]
\end{aligned}$$

Ecuación 181 Aceleración del punto P4 vista desde el sistema newtoniano en base B-Organizada.

Para hallar los tres puntos restantes, es decir, P6, P7 y P8, el procedimiento es muy similar al realizado en las velocidades que consistió en transformar los puntos P3, P4 y P5 a las bases E, C y G respectivamente:

Transformación de P3 a base E:

$$\begin{aligned}
{}^N\vec{a}^{P3} = & \left[\left(a_{x1} C_1 + a_{y1} + h\theta + lr^2 \right. \right. \\
& \left. \left. + lb \cdot \frac{1}{2} \hat{\theta}_B \right) (C_4 \hat{e}_x - S_4 \hat{e}_z) \right. \\
& \left. + \left[\left(a_{y1} C_1 - a_{x1} S_1 + \frac{lr\theta + h^2}{2A} \hat{\theta}_A \right) C_2 \right. \right. \\
& \left. \left. - \left(a_{x1} C_1 + a_{y1} S_1 + \frac{\theta + lr^2}{hA} \hat{\theta}_B \right) S_2 - \frac{\theta_B lb}{2} \right] \hat{e}_y \right. \\
& \left. + a_z (-S_4 \hat{e}_x + C_4 \hat{e}_z) \right]
\end{aligned}$$

Ecuación 182 Aceleración del punto P3 vista desde el sistema newtoniano en base E.

$$\begin{aligned}
{}^N\vec{a}^{P3} = \{ & [(a_{x1} C_1 + a_{y1} S_1 + h\theta_A + \frac{lr^2}{2} \theta_A) C_2 + (a_y C_1 - a_x S_1 + \frac{lr\theta_A + h^2}{2} \theta_A) S_2 \\
& + \frac{lb}{\theta_B} C_4 - a_z S_4] \hat{e}_x \\
& + [(a_{y1} C_1 - a_{x1} S_1 + \frac{lr\theta_A + h^2}{2} \theta_A) C_2 \\
& - (a_{x1} C_1 + a_{y1} S_1 + \frac{h\theta_A + lr^2}{2} \theta_A) S_2 + \frac{\theta_B lb}{2} \hat{e}_y \\
& + [(a_{x1} C_1 + a_{y1} S_1 + h\theta_A + \frac{lr^2}{2} \theta_A) C_2 \\
& + (a_{y1} C_1 - a_{x1} S_1 + \frac{lr\theta_A + h^2}{2} \theta_A) S_2 + \frac{lb}{\theta_B} S_4 + a_z C_4] \hat{e}_z
\end{aligned}$$

Ecuación 183 Aceleración del punto P3 vista desde el sistema newtoniano en base E – Organizada.

Transformación de P4 a base C:

$$\begin{aligned}
{}^N\vec{a}^{P4} = [& (a_{x1} C_1 + a_{y1} S_1 + h\theta_A + \frac{lr^2}{2} \theta_A) C_2 + (a_y C_1 - a_x S_1 + \frac{lr\theta_A + h^2}{2} \theta_A) S_2 \\
& - \frac{lb}{\theta_B} (C_3 \hat{c}_x - S_3 \hat{c}_z) \\
& + [(a_{y1} C_1 - a_{x1} S_1 + \frac{lr\theta_A + h^2}{2} \theta_A) C_2 \\
& - (a_{x1} C_1 + a_{y1} S_1 + \frac{h\theta_A + lr^2}{2} \theta_A) S_2 + \frac{\theta_B lb}{2} \hat{c}_y \\
& + a_z (-S_3 \hat{c}_x + C_3 \hat{c}_z)
\end{aligned}$$

Ecuación 184 Aceleración del punto P4 vista desde el sistema newtoniano en base C.

$$\begin{aligned}
{}^N\vec{a}^{P4} = \{ & [(a_{x1} C_1 + a_{y1} S_1 + h\theta_A + \frac{lr^2}{2} \theta_A) C_2 + (a_y C_1 - a_x S_1 + \frac{lr\theta_A + h^2}{2} \theta_A) S_2 \\
& - \frac{lb}{\theta_B} C_3 - a_z S_3] \hat{c}_x \\
& + [(a_{y1} C_1 - a_{x1} S_1 + \frac{lr\theta_A + h^2}{2} \theta_A) C_2 \\
& - (a_{x1} C_1 + a_{y1} S_1 + \frac{h\theta_A + lr^2}{2} \theta_A) S_2 + \frac{\theta_B lb}{2} \hat{c}_y
\end{aligned}$$

$$+ \left\{ \left[\begin{matrix} a_{x1} C_1 + a_{y1} S_1 + h\theta_A + lr^2 \\ - \frac{lb}{2} \theta_B^2 \end{matrix} \right] S_3 + a_z C_3 \right\} \hat{e}_z + \left(a_{y1} C_1 - a_{x1} S_1 + \frac{lr\theta_A + h\theta_A^2}{2} \right) S_2$$

Ecuación 185 Aceleración del punto P4 vista desde el sistema newtoniano en base C – Organizada.

Transformación de P5 a base G:

$${}^N \vec{a}^{P5} = \left(a_{x1} C_1 + a_{y1} S_1 + h\theta_A + lr^2 \right) (C_5 \hat{g} + S_5 \hat{g}) + \left(a_{y1} C_1 - a_{x1} S_1 + \frac{2lr\theta_A + h\theta_A^2}{2} \right) \hat{g} + a_z (-S_5 \hat{g} + S_5 \hat{g})$$

Ecuación 186 Aceleración del punto P5 vista desde el sistema newtoniano en base G.

$${}^N \vec{a}^{P5} = \left[\begin{matrix} a_{x1} C_1 + a_{y1} S_1 + h\theta_A + lr^2 \\ a_{y1} C_1 - a_{x1} S_1 + \frac{2lr\theta_A + h\theta_A^2}{2} \end{matrix} \right] C_5 + a_z S_5 \hat{g} + \left[\begin{matrix} a_{x1} C_1 + a_{y1} S_1 + h\theta_A + lr^2 \\ a_{y1} C_1 - a_{x1} S_1 + \frac{2lr\theta_A + h\theta_A^2}{2} \end{matrix} \right] S_5 + a_z C_5 \hat{g}$$

Ecuación 187 Aceleración del punto P5 vista desde el sistema newtoniano en base G – Organizada.

- **Aceleraciones de los puntos P6, P7 y P8**

$${}^N \vec{a}^{P6} = {}^N \vec{a}^{P4} + {}^N \vec{a}^{RC} x \vec{r}_{P_4 P_6} + {}^N \vec{\omega}^{RC} x ({}^N \vec{\omega}^{RC} x \vec{r}_{P_4 P_6})$$

Ecuación 188 Uso de la ecuación 4 para hallar la aceleración del punto P4.

$$({}^N \vec{a}^{RC} x \vec{r}_{P_4 P_6}) = \ddot{\theta}_C \hat{e}_y x (-h \hat{e}_z) = 0$$

Ecuación 189 Resultado del segundo término de la ecuación 177.

$${}^N \vec{\omega}^{RC} x ({}^N \vec{\omega}^{RC} x \vec{r}_{P_4 P_6}) = \ddot{\theta}_C \hat{e}_y x (0) = 0$$

Ecuación 190 Resultado del tercer término de la ecuación 177.

Con la operación anterior para hallar ${}^N \vec{a}^{P6}$ se concluye que:

$${}^N\vec{a}^{P_6} = {}^N\vec{a}^{P_4}$$

Ecuación 191 Aceleración del punto P6 vista desde el sistema newtoniano en base C.

$${}^N\vec{a}^{P_7} = {}^N\vec{a}^{P_3}$$

Ecuación 192 Aceleración del punto P7 vista desde el sistema newtoniano en base E.

$${}^N\vec{a}^{P_8} = {}^N\vec{a}^{P_5}$$

Ecuación 193 Aceleración del punto P8 vista desde el sistema newtoniano en base G.

8.1.4. POSICIONES DE LOS CENTROIDES DE LOS CUERPOS

De la misma manera en que se calcularon los vectores posición a los diferentes puntos de interés, así mismo se realizaron los vectores posición de dichos puntos hacia cada centroide, esto es, por cada cuerpo. Esto con el fin de hallar las aceleraciones de los centroides de los cuerpos y hallar las fuerzas que actúan en cada uno de ellos de manera numérica, por tal motivo se inicia con los vectores posición de la siguiente manera:

$$\vec{r}_{P_1RA}^* = lx_A \hat{a} - ly \hat{a} + lz \hat{a}$$

Ecuación 194 Vector posición del centroide de cuerpo RA a P1.

$$\vec{r}_{P_4RC}^* = -ly_C \hat{c}_y + lz_C \hat{c}_z$$

Ecuación 195 Vector posición del centroide de cuerpo RC a P4.

$$\vec{r}_{P_3RE}^* = -ly_E \hat{e}_y + lz_E \hat{e}_z$$

Ecuación 196 Vector posición del centroide RE a P3.

$$\vec{r}_{P_5RG}^* = -ly_G \hat{g}_y + lz_G \hat{g}_z$$

Ecuación 197 Vector posición del centroide RG a P5.

8.1.5. VELOCIDADES DE LOS CENTROIDES DE LOS CUERPOS

Con los vectores posición previamente hallados, se procede a hallar las velocidades de cada centroide, que corresponderían a las velocidades de cada cuerpo comenzando por RA. El procedimiento es mismo realizado para hallar las velocidades de los puntos de interés, en donde se utilizaba la ecuación de la relación de velocidad general:

- **Velocidad del centroide del cuerpo RA**

$${}^N\vec{V}_{P_{RA}^*} = {}^N\vec{V}_{P_1} + N\omega^{RA} \times \vec{r}_{P_1 P_{RA}^*}$$

Ecuación 198 Uso de la ecuación 3 para hallar velocidad del centroide de RA.

Se halla la velocidad angular del cuerpo RA y posteriormente se encuentra el resultado del segundo término con el vector posición del centroide de RA a P1:

$$N\omega^{RA} = \dot{\theta}_A \hat{a}_z$$

Ecuación 199 Velocidad angular del centroide de RA vista desde el sistema newtoniano.

$$N\omega^{RA} \times \vec{r}_{P_1 P_{RA}^*} = \dot{\theta}_A \hat{a}_z \times (l_x \hat{a}_x - l_y \hat{a}_y + l_z \hat{a}_z) = \dot{\theta}_A l_x \hat{a}_y + \dot{\theta}_A l_y \hat{a}_x$$

Ecuación 200 Resultado del segundo término de la ecuación 186.

Se reemplazan valores y se organizan:

$${}^N\vec{V}_{P_{RA}^*} = (V_x C_1 + V_y S_1) \hat{a}_x + (V_y C_1 - V_x S_1) \hat{a}_y + V_z \hat{a}_z + \dot{\theta}_A l_x \hat{a}_y + \dot{\theta}_A l_y \hat{a}_x$$

Ecuación 201 Velocidad del centroide del cuerpo RA vista desde el sistema newtoniano.

$${}^N\vec{V}_{P_{RA}^*} = (V_x C_1 + V_y S_1 + \dot{\theta}_A l_y) \hat{a}_x + (V_y C_1 - V_x S_1 + \dot{\theta}_A l_x) \hat{a}_y + V_z \hat{a}_z$$

Ecuación 202 Velocidad del centroide del cuerpo RA vista desde el sistema newtoniano – Organizada.

- **Velocidad del centroide del cuerpo RB**

El centroide del cuerpo RB y el punto P2 tienen la particularidad de ser el mismo punto, puesto que es el único centroide que no sobresale del cuerpo.

De esto se concluye que la velocidad de punto P2 es igual a la velocidad del cuerpo RB.

$${}^N\vec{V}^{P_2} = {}^N\vec{V}^{P_{RB^*}}$$

Ecuación 203 Velocidad del centroide del cuerpo RB vista desde el sistema newtoniano.

- **Velocidad del centroide del cuerpo RC**

Se utiliza la ecuación de la relación de la velocidad general:

$${}^N\vec{V}^{P_{RC^*}} = {}^N\vec{V}^{P_4} + {}^N\omega^{RC} \times \vec{r}_{P_4 P_{RC^*}}$$

Ecuación 204 Uso de la ecuación 3 para hallar velocidad del centroide de RC.

Se halla la velocidad angular de RC y con el vector posición del centroide de RC a P4, se resuelve el segundo término:

$${}^N\omega^{RC} = \dot{\theta}_C \hat{e}_y$$

Ecuación 205 Velocidad angular del centroide de RC vista desde el sistema newtoniano.

$${}^N\omega^{RC} \times \vec{r}_{P_4 P_{RC^*}} = \dot{\theta}_C \hat{e}_y \times (-l_y \hat{e}_x + l_z \hat{e}_z) = -l_z \dot{\theta}_C \hat{e}_x$$

Ecuación 206 Resultado del segundo término de la ecuación 192.

Se reemplazan valores y se organizan:

$$\begin{aligned} {}^N\vec{V}^{P_{RC^*}} = & \left\{ \left[(V_{x1} + V_{y1} S + h\theta_A) C + (V_{y1} C - V_{x1} S + \frac{lr}{2} \theta_A) S \right] C - V_{y1} S \right\} \hat{e}_x \\ & + \left[(V_{y1} C - V_{x1} S + \frac{lr}{2} \theta_A) C - (V_{x1} C + V_{y1} S + h\theta_A) S + \frac{\dot{\theta}_B}{2} \right] \hat{e}_y \\ & + \left\{ \left[(V_{x1} C + V_{y1} S + h\theta_A) C + (V_{y1} C - V_{x1} S + \frac{lr}{2} \theta_A) S \right] S \right. \\ & \left. + V_{y1} C \right\} \hat{e}_z - l_z \dot{\theta}_C \hat{e}_x \end{aligned}$$

Ecuación 207 Velocidad del centroide del cuerpo RC vista desde el sistema newtoniano.

$$\begin{aligned}
{}^N\vec{V}_{P_{RC}^*} = & \{ [(V_{x1} + V_{y1} + h\theta_A)C_2 + (V_{y1} - V_{x1} + \frac{lr}{2}\theta_A)S_2]C_3 - V_{z3} \\
& - lz_C\dot{\theta}_C\} \hat{e}_x \\
& + [(V_{y1} - V_{x1} + \frac{lr}{2}\theta_A)C_2 - (V_{x1} + V_{y1} + h\theta_A)S_2 + \frac{lb}{2}\dot{\theta}_B] \hat{e}_y \\
& + \{ [(V_{x1} + V_{y1} + h\theta_A)C_2 + (V_{y1} - V_{x1} + \frac{lr}{2}\theta_A)S_2]S_3 \\
& + V_{z3}C_3\} \hat{e}_z
\end{aligned}$$

Ecuación 208 Velocidad del centroide del cuerpo RC vista desde el sistema newtoniano – Organizada.

- **Velocidad del centroide del cuerpo RE**

Se utiliza la ecuación de la relación de velocidad general:

$${}^N\vec{V}_{P_{RE}^*} = {}^N\vec{V}_{P_3} + {}^N\omega^{RE} \times \vec{r}_{P_3 P_{RE}^*}$$

Ecuación 209 Uso de la ecuación 3 para hallar velocidad del centroide de RE.

Se halla la velocidad angular de RE y con el vector posición del centroide de RE a P3, se resuelve el segundo término:

$${}^N\omega^{RE} = \dot{\theta}_E \hat{e}_y$$

Ecuación 210 Velocidad angular del centroide de RC vista desde el sistema newtoniano.

$${}^N\omega^{RE} \times \vec{r}_{P_3 P_{RE}^*} = \dot{\theta}_E \hat{e}_y \times (-ly_E \hat{e}_x + lz_E \hat{e}_z) = lz_E \dot{\theta}_E \hat{e}_x$$

Ecuación 211 Resultado del segundo término de la ecuación 197.

Se reemplazan valores y se organizan:

$$\begin{aligned}
{}^N\vec{V}^{P_{RE}^*} = & \left\{ \left[\left(V_{x1} + V_{y1} + h\theta_A \right) C_2 + \left(V_{y1} - V_{x1} + \frac{lr}{2} \theta_A \right) S_2 \right] C_4 - V_{z4} \right. \\
& + \left. lz_E \dot{\theta}_E \right\} \hat{e}_x \\
& + \left\{ \left(V_{y1} - V_{x1} + \frac{lr}{2} \theta_A \right) C_2 - \left(V_{x1} + V_{y1} + h\theta_A \right) S_2 - \frac{lb}{2} \dot{\theta}_B \right\} \hat{e}_y \\
& + \left\{ \left[\left(V_{x1} + V_{y1} + h\theta_A \right) C_2 + \left(V_{y1} - V_{x1} + \frac{lr}{2} \theta_A \right) S_2 \right] S_4 \right. \\
& \left. + V_{z4} \right\} \hat{e}_z
\end{aligned}$$

Ecuación 212 Velocidad del centroide del cuerpo RC vista desde el sistema newtoniano – Organizada.

- **Velocidad del centroide del cuerpo RG**

Se utiliza la ecuación de la relación de velocidad general:

$${}^N\vec{V}^{P_{RG}^*} = {}^N\vec{V}^{P_5} + {}^N\omega^{RG} \times \vec{r}_{P_5 P_{RG}^*}$$

Ecuación 213 Uso de la ecuación 3 para hallar velocidad del centroide de RG.

Se halla la velocidad angular de RE y con el vector posición del centroide de RE a P3, se resuelve el segundo término:

$${}^N\omega^{RG} = \dot{\theta}_G \hat{g}$$

Ecuación 214 Velocidad angular del centroide de RG vista desde el sistema newtoniano.

$${}^N\omega^{RG} \times \vec{r}_{P_5 P_{RG}^*} = \dot{\theta}_G \hat{g} \times \left[-ly_G \hat{g} + lz_G \hat{g} \right] = lz_G \dot{\theta}_G \hat{g}$$

Ecuación 215 Resultado del segundo término de la ecuación 201.

Se reemplazan valores y se organizan:

$$\begin{aligned}
{}^N\vec{V}^{P_{RG}^*} = & \left[\left(V_{x1} + V_{y1} + h\theta_A \right) C_2 - V_{z5} + lz_G \dot{\theta}_G \right] \hat{g}_x + \left[\left(V_{y1} - V_{x1} + \frac{lr}{2} \theta_A \right) S_2 \right] \hat{g}_y \\
& + \left[\left(V_{x1} C_1 + V_{y1} S_1 + h\theta_A \right) S_5 + V_{z5} C_5 \right] \hat{g}_z
\end{aligned}$$

Ecuación 216 Velocidad del centroide del cuerpo RG vista desde el sistema newtoniano – Organizada.

8.1.6. ACELERACIONES DE LOS CENTROIDES DE LOS CUERPOS

En este apartado es donde se encontrarán las aceleraciones de los centroides de los cuerpos que se están analizando y, por consiguiente, poder hallar las fuerzas que actúan sobre ellos:

- **Aceleración del centroide del cuerpo RA**

Para hallar las aceleraciones de cada uno de los cuerpos, el proceso es muy similar al utilizado para hallar las aceleraciones de los puntos P1 hasta P8. Se usa la ecuación de la relación de aceleración general para establecer los términos a resolver, se obtienen las aceleraciones y velocidades angulares correspondientes, se realizan operaciones y organizan los valores:

$${}^N\vec{a}^{P_{RA*}} = {}^N\vec{a}^{P1} + {}^N\vec{\alpha}^{RA} \times \vec{r}_{P1\ RA*} + {}^N\vec{\omega}^{RA} \times ({}^N\vec{\omega}^{RA} \times \vec{r}_{P1\ RA*})$$

Ecuación 217 Uso de la ecuación 4 para hallar la aceleración del centroide de RA.

Se halla la aceleración angular del cuerpo RA y se realiza el producto cruz entre este valor y el vector posición del centroide del cuerpo RA al punto P1:

$$({}^N\vec{\alpha}^{RA} \times \vec{r}_{P1\ RA*}) = \ddot{\theta}_A \hat{q}_z \times (l_{x_{A*}} \hat{q}_x - l_{y_{A*}} \hat{q}_y + l_{z_{A*}} \hat{q}_z)$$

Ecuación 218 Resultado del segundo término de la ecuación 205.

$$({}^N\vec{\alpha}^{RA} \times \vec{r}_{P1\ RA*}) = l_{x_{A*}} \ddot{\theta}_A \hat{q}_y + l_{y_{A*}} \theta_A \hat{q}_x$$

Ecuación 219 Resultado del segundo término de la ecuación 205 – Organizada.

Al llegar a este término ya se tienen todos los valores, solo hace falta hacer los respectivos productos cruz:

$${}^N\vec{\omega}^{RA} \times ({}^N\vec{\omega}^{RA} \times \vec{r}_{P1\ RA*}) = \theta_A \hat{q}_z \times (l_{x_{A*}} \theta_A \hat{q}_y + l_{y_{A*}} \dot{\theta}_A \hat{q}_x)$$

Ecuación 220 Resultado del tercer término de la ecuación 205.

$${}^N\vec{\omega}^{RA} \times ({}^N\vec{\omega}^{RA} \times \vec{r}_{P1\ RA*}) = -l_{x_{A*}} \dot{\theta}_A^2 \hat{q}_x + l_{y_{A*}} \theta_A^2 \hat{q}_y$$

Ecuación 221 Resultado del tercer término de la ecuación 205 – Organizada.

Se reemplazan valores y se organizan:

$${}^N\vec{a}^{P_{RA^*}} = [a_x C_1 + a_y S_1 + \dot{\psi}_{A^*} \theta_A - l x_{A^*} \dot{\theta}_A^2] \hat{q}_x + [a_y C_1 - a_x S_1 + l x_{A^*} \dot{\theta}_A^2 + \dot{\psi}_{A^*} \dot{\theta}_A^2] \hat{q}_y + a_z \hat{q}_z$$

Ecuación 222 Aceleración del centroide del cuerpo RA vista desde el sistema newtoniano – Organizada.

- **Aceleración del centroide del cuerpo RB**

Como se había comentado anteriormente, al ser el punto P2 y el centroide del cuerpo RB el mismo punto, se concluye que:

$${}^N\vec{a}^{P_{B^*}} = {}^N\vec{a}^{P_2}$$

Ecuación 223 Aceleración del centroide del cuerpo RB vista desde el sistema newtoniano.

- **Aceleración del centroide del cuerpo RC**

Se usa la ecuación de la relación de aceleración general:

$${}^N\vec{a}^{P_{RC^*}} = {}^N\vec{a}^{P_4} + {}^N\vec{\alpha}^{RC} \times \vec{r}_{P_4 P_{RC^*}} + {}^N\vec{\omega}^{RC} \times ({}^N\vec{\omega}^{RC} \times \vec{r}_{P_4 P_{RC^*}})$$

Ecuación 224 Uso de la ecuación 4 para hallar la aceleración del centroide de RC.

Se halla la aceleración angular del cuerpo RC y se realiza el producto cruz entre este valor y el vector posición del centroide del cuerpo RC al punto P4:

$$({}^N\vec{\alpha}^{RC} \times \vec{r}_{P_4 P_{RC^*}}) = \dot{\theta}_C \hat{c}_y \times (-l y_{C^*} \hat{c}_y + l z_{C^*} \hat{c}_z)$$

Ecuación 225 Resultado del segundo término de la ecuación 212.

$$({}^N\vec{\alpha}^{RC} \times \vec{r}_{P_4 P_{RC^*}}) = l z_{C^*} \ddot{\theta}_C \hat{c}_x$$

Ecuación 226 Resultado del segundo término de la ecuación 212 – Organizada.

Al llegar a este término ya se tienen todos los valores, solo hace falta hacer los respectivos productos cruz:

$${}^N\vec{\omega}^{RC} \times ({}^N\vec{\omega}^{RC} \times \vec{r}_{P_4 P_{RC^*}}) = \dot{\theta}_C \hat{c}_y \times (-l z_{C^*} \dot{\theta}_C \hat{c}_x)$$

Ecuación 227 Resultado del tercer término de la ecuación 212.

$${}^N\vec{\omega}^{RC} \times ({}^N\vec{\omega}^{RC} \times \vec{r}_{P P}^{RC*}) = l z_{C*} \dot{\theta}_C^2 \hat{e}_C$$

Ecuación 228 Resultado del tercer término de la ecuación 212 – Organizada.

Se reemplazan valores y se organizan:

$$\begin{aligned} {}^N\vec{a}^{PRC*} = & \{ [(a_{x1} + a_{y1} S + h\theta + lr^2 - \frac{2}{A} \theta_A) C_2 + (a_y C_1 - a_x S_1 + \frac{lr\theta + h^2}{2A} \theta_A) S_2 \\ & - \frac{lb^2}{2}] C_3 - a_z S_3 + l z_{C*} \theta_C \} \hat{e}_x \\ & + \{ (a_{y1} C - a_{x1} S + \frac{lr\theta + h^2}{2A} \theta_A) C_2 \\ & - (a_{x1} C + a_{y1} S + \theta + \frac{lr^2}{2} \theta_A) S_2 + \frac{\theta_B lb}{2} \} \hat{e}_y \\ & + \{ [(a_{x1} C + a_{y1} S + h\theta + \frac{lr^2}{2} \theta_A) C_2 \\ & + (a_{y1} C - a_{x1} S + \frac{lr\theta + h^2}{2A} \theta_A) S_2 - \frac{lb^2}{2} \theta_B] S_5 + a_z C_5 \\ & + l z_{C*} \dot{\theta}_C^2 \} \hat{e}_z \end{aligned}$$

Ecuación 229 Aceleración del centroide del cuerpo RC – Organizada.

- **Aceleración del centroide del cuerpo RE**

Se usa la ecuación de la relación de aceleración general:

$${}^N\vec{a}^{PRE*} = {}^N\vec{a}^{P3} + {}^N\vec{a}^{RE} \times \vec{r}_{P P}^{RE*} + {}^N\vec{\omega}^{RE} \times ({}^N\vec{\omega}^{RE} \times \vec{r}_{P P}^{RE*})$$

Ecuación 230 Uso de la ecuación 4 para hallar la aceleración del centroide de RE.

Se halla la aceleración angular del cuerpo RE y se realiza el producto cruz entre este valor y el vector posición del centroide del cuerpo RE al punto P3:

$$({}^N\vec{a}^{RE} \times \vec{r}_{P P}^{RE*}) = \ddot{\theta}_E \hat{e}_y \times (-ly \hat{e}_y + l z_{E*} \hat{e}_z)$$

Ecuación 231 Resultado del segundo término de la ecuación 218.

$$({}^N\vec{a}^{RE} \times \vec{r}_{P P}^{RE*}) = l z_{E*} \ddot{\theta}_E \hat{e}_x$$

Ecuación 232 Resultado del segundo término de la ecuación 218 – Organizada.

Al llegar a este término ya se tienen todos los valores, solo hace falta hacer los respectivos productos cruz:

$${}^N\vec{\omega}^{RE} \times ({}^N\vec{\omega}^{RE} \times \vec{r}_{P_{RE^*}}) = \dot{\theta}_E \hat{e}_3 \times (-l_{z_{E^*}} \dot{\theta}_E \hat{e}_3)$$

Ecuación 233 Resultado del tercer término de la ecuación 218.

$${}^N\vec{\omega}^{RE} \times ({}^N\vec{\omega}^{RE} \times \vec{r}_{P_{RE^*}}) = l_{z_{E^*}} \dot{\theta}_E^2 \hat{e}_3$$

Ecuación 234 Resultado del tercer término de la ecuación 218 – Organizada.

Se reemplazan valores y se organizan:

$$\begin{aligned} {}^N\vec{a}^{PRE^*} = & \{ [(a_{x1} + a_y S + h\theta + lr^2 \frac{\theta_A}{2}) C_2 + (a_y C_1 - a_x S_1 + \frac{lr\theta + h}{2} \theta_A^2) S_2 \\ & - \frac{lb}{2} \theta_B^2] C_4 - a_z S_4 + l_{z_{E^*}} \dot{\theta}_E \} \hat{e}_3 \\ & + \{ (a_{y1} C - a_{x1} S + lr\theta + h \frac{\theta_A}{2}) C_2 \\ & - (a_{x1} C + a_{y1} S + \theta + lr^2 \frac{\theta_B}{2} lb) \} \hat{e}_y \\ & + \{ [(a_{x1} C + a_{y1} S + h\theta + lr^2 \frac{\theta_A}{2}) C_2 \\ & + (a_{y1} C - a_{x1} S + lr\theta + h \frac{\theta_A}{2}) S_2 - \frac{lb}{2} \theta_B^2] S_4 + a_z C_4 \\ & - l_{z_{E^*}} \dot{\theta}_E^2 \} \hat{e}_z \end{aligned}$$

Ecuación 235 Aceleración del centroide del cuerpo RE vista desde el sistema newtoniano – Organizada.

- **Aceleración del centroide del cuerpo RG**

Se usa la ecuación de la relación de aceleración general:

$${}^N\vec{a}^{PRG^*} = {}^N\vec{a}^{P5} + {}^N\vec{a}^{RG} \times \vec{r}_{P_{RG^*}} + {}^N\vec{\omega}^{RG} \times ({}^N\vec{\omega}^{RG} \times \vec{r}_{P_{RG^*}})$$

Ecuación 236 Uso de la ecuación 4 para hallar la aceleración del centroide de RG.

Se halla la aceleración angular del cuerpo RG y se realiza el producto cruz entre este valor y el vector posición del centroide del cuerpo RG al punto P5:

$$({}^N\vec{\alpha}^{RG} \times \vec{r}_{P_5}^{RG*}) = \ddot{\theta}_G \hat{g}_x (-ly_{G^*} \hat{g}_y + lz_{G^*} \hat{g}_z)$$

Ecuación 237 Resultado del segundo término de la ecuación 224.

$$({}^N\vec{\alpha}^{RG} \times \vec{r}_{P_5}^{RG*}) = lz_{G^*} \ddot{\theta}_G \hat{g}_x$$

Ecuación 238 Resultado del segundo término de la ecuación 224 – Organizada.

Al llegar a este término ya se tienen todos los valores, solo hace falta hacer los respectivos productos cruz:

$${}^N\vec{\omega}^{RG} \times ({}^N\vec{\omega}^{RG} \times \vec{r}_{P_5}^{RG*}) = \dot{\theta}_G \hat{g}_x (lz_{G^*} \dot{\theta}_G \hat{g}_y)$$

Ecuación 239 Resultado del tercer término de la ecuación 224.

$${}^N\vec{\omega}^{RG} \times ({}^N\vec{\omega}^{RG} \times \vec{r}_{P_5}^{RG*}) = -lz_{G^*} \dot{\theta}_G^2 \hat{g}_z$$

Ecuación 240 Resultado del tercer término de la ecuación 224 – Organizada.

Se reemplazan valores y se organizan:

$$\begin{aligned} {}^N\vec{a}^{PRG*} = & [(a_{x1} + a_{y1} S_A + h\theta + lr^2 \frac{1}{2} \theta_A) C_5 - a_z S_5 + lz_{G^*} \theta \hat{g}_x \\ & + [a_{y1} C_A - a_{x1} S_A + lr^2 \theta + h \theta_A^2] \hat{g}_y \\ & + [(a_{x1} C_A + a_{y1} S_A + h\theta + lr^2 \frac{1}{2} \theta_A) S_5 + a_z C_5 - lz_{G^*} \theta^2] \hat{g}_z \end{aligned}$$

Ecuación 241 Aceleración del centroide del cuerpo RG vista desde el sistema newtoniano – Organizada.

8.1.7. DIAGRAMAS DE CUERPO LIBRE

En este apartado se mostrarán los diagramas de cuerpo libre realizado a los dos cuerpos faltantes, recordemos que esta información es la continuación de la información presentada en el desarrollo del documento.

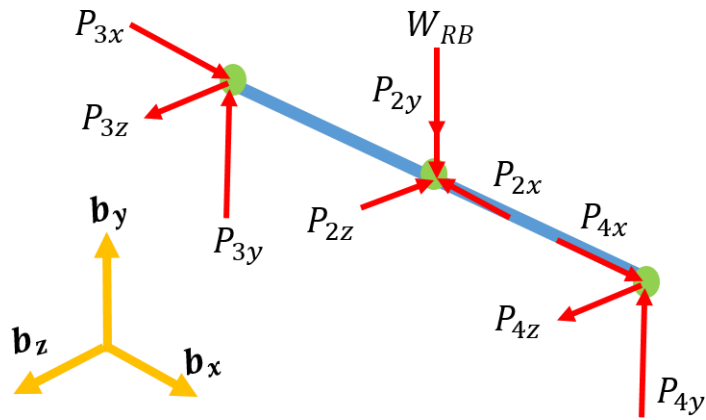


Ilustración 156 DCL del bogie.

En el anterior diagrama se pueden ver las fuerzas que interactúan con el bogie y las direcciones supuestas para el análisis de fuerzas y momentos, de la misma manera en la siguiente ilustración se muestran las fuerzas pero esta vez para el cuerpo "c", recordemos que en el mecanismo rocker-bogie tenemos tres piezas iguales c's, por tal motivo aparece el diagrama de manera general donde la "i" se remplazara por el valor del punto donde esta aplicada la fuerza y la "j" se remplazara por el sistema coordenado del cuerpo según sea el caso.

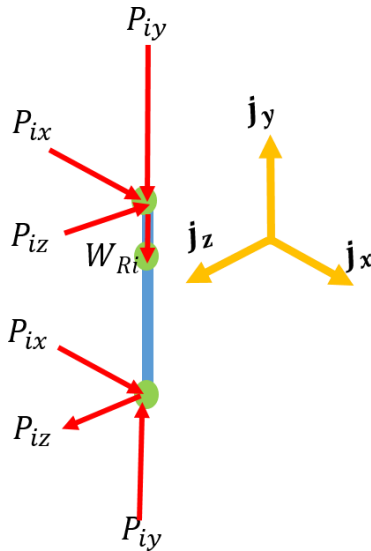


Ilustración 157 DCL de las c's.

8.1.8. SUMATORIA DE FUERZAS

En este apartado se muestran las ecuaciones de fuerzas obtenidas durante el modelamiento matemático, recordemos que esta parte es la continuación presentada arriba, por tal motivo no aparecerán las ecuaciones correspondientes a la sumatoria de fuerzas del rocker, las cuales aparecen en el desarrollo de este documento, las ecuaciones que si aparecen son las del bogie y cada una de las c's del mecanismo, como se muestra a continuación.

$$F_{P3} - F_{P2} + F_{P4} - W_{RB} = {}^N a_{RB^*} \cdot m_{RB}$$

Ecuación 242 Sumatoria de fuerzas del bogie.

$$F_{P3x} - F_{P2x} + F_{P4x} = {}^N a_{RB^*x} \cdot m_{RB}$$

Ecuación 243 Sumatoria de fuerzas de bogie en x.

$$F_{P3y} - F_{P2y} + F_{P4y} - W_{RB} = {}^N a_{RB^*y} \cdot m_{RB}$$

Ecuación 244 Sumatoria de fuerzas de bogie en y.

$$F_{P3z} - F_{P2z} + F_{P4z} = {}^N a_{RB^*z} \cdot m_{RB}$$

Ecuación 245 Sumatoria de fuerzas de bogie en z.

$$F_{P7} - F_{P3} - W_{RE} = {}^N a_{RE^*} \cdot m_{RE}$$

Ecuación 246 Sumatoria de fuerzas de la c de nombre E.

$$F_{P7x} - F_{P3x} = {}^N a_{RE^*x} \cdot m_{RE}$$

Ecuación 247 Sumatoria de fuerzas de la c de nombre E en x.

$$F_{P7y} - F_{P3y} - W_{RE} = {}^N a_{RE^*y} \cdot m_{RE}$$

Ecuación 248 Sumatoria de fuerzas de la c de nombre E en y.

$$F_{P7z} - F_{P3z} = {}^N a_{RE^*z} \cdot m_{RE}$$

Ecuación 249 Sumatoria de fuerzas de la c de nombre E en z.

$$F_{P6} - F_{P4} - W_{RC} = {}^N a_{RC^*} \cdot m_{RC}$$

Ecuación 250 Sumatoria de fuerzas de la c de nombre C.

$$F_{P6x} - F_{P4x} = {}^N a_{RC^*x} \cdot m_{RC}$$

Ecuación 251 Sumatoria de fuerzas de la c de nombre C en x.

$$F_{P6y} - F_{P4y} - W_{RC} = {}^N a_{RC^*y} \cdot m_{RC}$$

Ecuación 252 Sumatoria de fuerzas de la c de nombre C en y.

$$F_{P6z} - F_{P4z} = {}^N a_{RC^*z} \cdot m_{RC}$$

Ecuación 253 Sumatoria de fuerzas de la c de nombre C en z.

$$F_{P8} - F_{P5} - W_{RG} = {}^N a_{RG^*} \cdot m_{RG}$$

Ecuación 254 Sumatoria de fuerzas de la c de nombre G.

$$F_{P8x} - F_{P5x} = {}^N a_{RG^*x} \cdot m_{RG}$$

Ecuación 255 Sumatoria de fuerzas de la c de nombre G en x.

$$F_{P8y} - F_{P5y} - W_{RG} = {}^N a_{RG^*y} \cdot m_{RG}$$

Ecuación 256 Sumatoria de fuerzas de la c de nombre G en y.

$$F_{P8z} - F_{P5z} = {}^N a_{RG^*z} \cdot m_{RG}$$

Ecuación 257 Sumatoria de fuerzas de la c de nombre G en z.

8.1.9. SUMATORIA DE MOMENTOS

De manera similar como se mostraron la continuación de las ecuaciones de fuerza de los cuerpos bogie y cada una de las c's, en este inciso se mostrará las ecuaciones obtenidas mediante el análisis de momentos de los mismos cuerpos.

$$F_{P3} \times \vec{r}_{P_B^*P3} + F_{P4} \times \vec{r}_{P_B^*P4} = \vec{I}^{B/B^*} \cdot N\vec{\alpha}^B + N\vec{\omega}^B \times (\vec{I}^{B/B^*} \cdot N\vec{\omega}^B)$$

Ecuación 258 Sumatoria de momentos del bogie.

$$\begin{aligned} & N r_{PB^*P3z} \cdot F_{P3y} - N r_{PB^*P3y} \cdot F_{P3z} - N r_{PBP4y} \cdot F_{P4z} + N r_{PB^*P4z} \cdot F_{P4y} \\ & = \theta_{By} \cdot (I_{bb31} \cdot \theta_{Bx} + I_{bb32} \cdot \theta_{By} + I_{bb33} \cdot \theta_{Bz}) - \theta_{Bz} \\ & \cdot (I_{bb21} \cdot \theta_{Bx} + I_{bb22} \cdot \theta_{By} + I_{bb23} \cdot \theta_{Bz}) + I_{bb11} \cdot \theta_{Bx} + I_{bb12} \\ & \cdot \theta_{By} + I_{bb13} \cdot \theta_{Bz} \end{aligned}$$

Ecuación 259 Sumatoria de momentos de bogie en x.

$$\begin{aligned} & N r_{PB^*P3x} \cdot F_{P3z} - N r_{PB^*P3z} \cdot F_{P3x} + N r_{PBP4x} \cdot F_{P4z} - N r_{PB^*P4x} \cdot F_{P4z} \\ & = \theta_{Bz} \cdot (I_{bb11} \cdot \theta_{Bx} + I_{bb12} \cdot \theta_{By} + I_{bb13} \cdot \theta_{Bz}) - \theta_{Bx} \\ & \cdot (I_{bb31} \cdot \theta_{Bx} + I_{bb32} \cdot \theta_{By} + I_{bb33} \cdot \theta_{Bz}) + I_{bb21} \cdot \theta_{Bx} + I_{bb22} \\ & \cdot \theta_{By} + I_{bb23} \cdot \theta_{Bz} \end{aligned}$$

Ecuación 260 Sumatoria de momentos de bogie en y.

$$\begin{aligned} & N r_{PB^*P3y} \cdot F_{P3x} - N r_{PB^*P3x} \cdot F_{P3y} - N r_{PBP4x} \cdot F_{P4y} + N r_{PB^*P4y} \cdot F_{P4x} \\ & = \theta_{Bx} \cdot (I_{bb21} \cdot \theta_{Bx} + I_{bb22} \cdot \theta_{By} + I_{bb23} \cdot \theta_{Bz}) - \theta_{By} \\ & \cdot (I_{bb11} \cdot \theta_{Bx} + I_{bb12} \cdot \theta_{By} + I_{bb13} \cdot \theta_{Bz}) + I_{bb31} \cdot \theta_{Bx} + I_{bb32} \\ & \cdot \theta_{By} + I_{bb33} \cdot \theta_{Bz} \end{aligned}$$

Ecuación 261 Sumatoria de momentos de bogie en z.

$$F_{P6} \times \vec{r}_{P_C^*P6} - F_{P4} \times \vec{r}_{P_C^*P4} = \vec{I}^{C/C^*} \cdot N\vec{\alpha}^C + N\vec{\omega}^C \times (\vec{I}^{C/C^*} \cdot N\vec{\omega}^C)$$

Ecuación 262 Sumatoria de momentos de la c de nombre C.

$$\begin{aligned}
& {}^N r_{PC^*P4y} \cdot F_{P4z} - {}^N r_{PC^*P4z} \cdot F_{P4y} - {}^N r_{PCP6y} \cdot F_{P6z} + {}^N r_{PC^*P6z} \cdot F_{P6y} \\
& = \theta_{Cy} \cdot (I_{cc31} \cdot \theta_{Cx} + I_{cc32} \cdot \theta_{Cy} + I_{cc33} \cdot \theta_{Cz}) - \theta_{Cz} \\
& \cdot (I_{cc21} \cdot \theta_{Cx} + I_{cc22} \cdot \theta_{Cy} + I_{cc23} \cdot \theta_{Cz}) + I_{cc11} \cdot \theta_{Cx} + I_{cc12} \cdot \theta_{Cy} \\
& + I_{cc13} \cdot \theta_{Cz}
\end{aligned}$$

Ecuación 263 Sumatoria de momentos de la c de nombre C en x.

$$\begin{aligned}
& {}^N r_{PC^*P4x} \cdot F_{P4z} - {}^N r_{PC^*P4z} \cdot F_{P4x} + {}^N r_{PCP6x} \cdot F_{P6z} - {}^N r_{PC^*P6z} \cdot F_{P6x} \\
& = \theta_{Cz} \cdot (I_{cc11} \cdot \theta_{Cx} + I_{cc12} \cdot \theta_{Cy} + I_{cc13} \cdot \theta_{Cz}) - \theta_{Cx} \\
& \cdot (I_{cc31} \cdot \theta_{Cx} + I_{cc32} \cdot \theta_{Cy} + I_{cc33} \cdot \theta_{Cz}) + I_{cc21} \cdot \theta_{Cx} + I_{cc22} \cdot \theta_{Cy} \\
& + I_{cc23} \cdot \theta_{Cz}
\end{aligned}$$

Ecuación 264 Sumatoria de momentos de la c de nombre C en y.

$$\begin{aligned}
& {}^N r_{PC^*P4x} \cdot F_{P4y} - {}^N r_{PC^*P4y} \cdot F_{P4x} - {}^N r_{PCP6x} \cdot F_{P6y} + {}^N r_{PC^*P6y} \cdot F_{P6x} \\
& = \theta_{Cx} \cdot (I_{cc21} \cdot \theta_{Cx} + I_{cc22} \cdot \theta_{Cy} + I_{cc23} \cdot \theta_{Cz}) - \theta_{Cy} \\
& \cdot (I_{cc11} \cdot \theta_{Cx} + I_{cc12} \cdot \theta_{Cy} + I_{cc13} \cdot \theta_{Cz}) + I_{cc31} \cdot \theta_{Cx} + I_{cc32} \cdot \theta_{Cy} \\
& + I_{cc33} \cdot \theta_{Cz}
\end{aligned}$$

Ecuación 265 Sumatoria de momentos de la c de nombre C en z.

$${}^F_{P7} \times \vec{r}_{P_E^*P7} - {}^F_{P3} \times \vec{r}_{P_E^*P3} = \vec{I}^{E/E^*} \cdot N \vec{\alpha}^E + N \vec{\omega}^E \times (\vec{I}^{E/E^*} \cdot N \vec{\omega}^E)$$

Ecuación 266 Sumatoria de momentos de la c de nombre E.

$$\begin{aligned}
& {}^N r_{PE^*P3y} \cdot F_{P3z} - {}^N r_{PE^*P3z} \cdot F_{P3y} - {}^N r_{PEP7y} \cdot F_{P7z} + {}^N r_{PE^*P7z} \cdot F_{P7y} \\
& = \theta_{Ey} \cdot (I_{ee31} \cdot \theta_{Ex} + I_{ee32} \cdot \theta_{Ey} + I_{ee33} \cdot \theta_{Ez}) - \theta_{Ez} \\
& \cdot (I_{ee21} \cdot \theta_{Ex} + I_{ee22} \cdot \theta_{Ey} + I_{ee23} \cdot \theta_{Ez}) + I_{ee11} \cdot \theta_{Ex} + I_{ee12} \\
& \cdot \theta_{Ey} + I_{ee13} \cdot \theta_{Ez}
\end{aligned}$$

Ecuación 267 Sumatoria de momentos de la c de nombre E en x.

$$\begin{aligned}
& N r_{PE^*P3z} \cdot F_{P3x} - N r_{PE^*P3x} \cdot F_{P3z} + N r_{PEP7x} \cdot F_{P7z} - N r_{PE^*P7z} \cdot F_{P7x} \\
& = \theta_{Ez} \cdot (I_{ee11} \cdot \theta_{Ex} + I_{ee12} \cdot \theta_{Ey} + I_{ee13} \cdot \theta_{Ez}) - \theta_{Ex} \\
& \cdot (I_{ee31} \cdot \theta_{Ex} + I_{ee32} \cdot \theta_{Ey} + I_{ee33} \cdot \theta_{Ez}) + I_{ee21} \cdot \theta_{Ex} + I_{ee22} \\
& \cdot \theta_{Ey} + I_{ee23} \cdot \theta_{Ez}
\end{aligned}$$

Ecuación 268 Sumatoria de momentos de la c de nombre E en y.

$$\begin{aligned}
& N r_{PE^*P3x} \cdot F_{P3y} - N r_{PE^*P3y} \cdot F_{P3x} - N r_{PEP7x} \cdot F_{P7y} + N r_{PE^*P7y} \cdot F_{P7x} \\
& = \theta_{Ex} \cdot (I_{ee21} \cdot \theta_{Ex} + I_{ee22} \cdot \theta_{Ey} + I_{ee23} \cdot \theta_{Ez}) - \theta_{Ey} \\
& \cdot (I_{ee11} \cdot \theta_{Ex} + I_{ee12} \cdot \theta_{Ey} + I_{ee13} \cdot \theta_{Ez}) + I_{ee31} \cdot \theta_{Ex} + I_{ee32} \\
& \cdot \theta_{Ey} + I_{ee33} \cdot \theta_{Ez}
\end{aligned}$$

Ecuación 269 Sumatoria de momentos de la c de nombre E en z.

$$F_{P8} \times \vec{r}_{PG^*P8} - F_{P5} \times \vec{r}_{PG^*P5} = \vec{I}^{G/G^*} \cdot N \vec{\alpha}^G + N \vec{\omega}^G \times (I^{G/G^*} \cdot N \vec{\omega}^G)$$

Ecuación 270 Sumatoria de momentos de la c de nombre G.

$$\begin{aligned}
& N r_{PG^*P5y} \cdot F_{P5z} - N r_{PG^*P5z} \cdot F_{P5y} - N r_{PGP8y} \cdot F_{P8z} + N r_{PG^*P8z} \cdot F_{P8y} \\
& = \theta_{Gy} \cdot (I_{gg31} \cdot \theta_{Gx} + I_{gg32} \cdot \theta_{Gy} + I_{gg33} \cdot \theta_{Gz}) - \theta_{Gz} \\
& \cdot (I_{gg21} \cdot \theta_{Gx} + I_{gg22} \cdot \theta_{Gy} + I_{gg23} \cdot \theta_{Gz}) + I_{gg11} \cdot \theta_{Gx} + I_{gg12} \\
& \cdot \theta_{Gy} + I_{gg13} \cdot \theta_{Gz}
\end{aligned}$$

Ecuación 271 Sumatoria de momentos de la c de nombre G en x.

$$\begin{aligned}
& N r_{PG^*P5z} \cdot F_{P5x} - N r_{PG^*P5x} \cdot F_{P5z} + N r_{PGP8x} \cdot F_{P8z} - N r_{PG^*P8z} \cdot F_{P8x} \\
& = \theta_{Gz} \cdot (I_{gg11} \cdot \theta_{Gx} + I_{gg12} \cdot \theta_{Gy} + I_{gg13} \cdot \theta_{Gz}) - \theta_{Gx} \\
& \cdot (I_{gg31} \cdot \theta_{Gx} + I_{gg32} \cdot \theta_{Gy} + I_{gg33} \cdot \theta_{Gz}) + I_{gg21} \cdot \theta_{Gx} + I_{gg22} \\
& \cdot \theta_{Gy} + I_{gg23} \cdot \theta_{Gz}
\end{aligned}$$

Ecuación 272 Sumatoria de momentos de la c de nombre G en y.

$$\begin{aligned}
& N r_{PG^*P5x} \cdot F_{P5y} - N r_{PG^*P5y} \cdot F_{P5x} - N r_{PGP8x} \cdot F_{P8y} + N r_{PG^*P8y} \cdot F_{P8x} \\
& = \theta_{Gx} \cdot (I_{gg21} \cdot \theta_{Gx} + I_{gg22} \cdot \theta_{Gy} + I_{gg23} \cdot \theta_{Gz}) - \theta_{Gy} \\
& \cdot (I_{gg11} \cdot \theta_{Gx} + I_{gg12} \cdot \theta_{Gy} + I_{gg13} \cdot \theta_{Gz}) + I_{gg31} \cdot \theta_{Gx} + I_{gg32} \\
& \cdot \theta_{Gy} + I_{gg33} \cdot \theta_{Gz}
\end{aligned}$$

Ecuación 273 Sumatoria de momentos de la c de nombre G en z.

8.2. MODELO MATEMÁTICO EN MATLAB

En este apartado se presentará la totalidad del documento creado en Matlab ® para solucionar tanto de manera simbólica como de manera numérica los cálculos hechos para el modelo matemático, la información contenida dentro del documento se presenta a continuación con el formato de Matlab ®.

Cabe resaltar que en el código realizado se encuentran 5 apartados, el primero es el correspondiente a las ecuaciones simbólicas, en el cual se muestran las operaciones parametrizadas del modelamiento matemático, el segundo corresponde a las ecuaciones numéricas el cual muestra el resultado numérico de las ecuaciones realizadas, el tercero corresponde a los valores máximos obtenidos por las ecuaciones numéricas para la obtención de todos los valores para el análisis por elementos finitos, el cuarto corresponde a los valores máximos de error al calcular cada una de las fuerzas, como anteriormente se mencionó esta matriz de soluciones no es solución única debido a la matriz "A" no es invertible, y finalmente un apartado de resultados el cual muestra gráficamente y numéricamente los valores de torque de los motores.

```

%% MODELO MATEMATICO VTRONT
% Este documento de MATLAB contiene el modelo matemático del
proyecto de grado titulado "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO A
ESCALA DE VEHÍCULO
% TIPO ROVER NO TRIPULADO PARA LA SIEMBRA, FUMIGACIÓN Y TRANSPORTE
DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS EN TERRENOS IRREGULARES DEL CORREGIMIENTO DE
BERLÍN SANTANDER"
% REALIZADO POR:          GUILLERMO ANTONIO CARRASQUILLA MERCADO
%                          HEIDER AUGUSTO CARVAJAL PULIDO
%                          JOSÉ DANIEL BOHORQUEZ GUERRA

```

```

clear all
close all
clc
%% ECUACIONES SIMBOLICAS
% En este apartado tendremos la simulación de todas las ecuaciones
sin ninguna simplificación y todo manejado de manera simbólico
% SUMATORIA DE FUERZAS - PARAMETROS
syms Fp1x Fp1y Fp1z Fp2x Fp2y Fp2z Fp3x Fp3y Fp3z Fp4x Fp4y Fp4z
Fp5x Fp5y Fp5z Fp6x Fp6y Fp6z Fp7x Fp7y Fp7z Fp8x Fp8y Fp8z
%FUERZAS
syms mRAS mRBS mRCS mRES mRGS g
Fp1S = [Fp1x; Fp1y; Fp1z];
Fp2S = [Fp2x; Fp2y; Fp2z];
Fp3S = [Fp3x; Fp3y; Fp3z];
Fp4S = [Fp4x; Fp4y; Fp4z];
Fp5S = [Fp5x; Fp5y; Fp5z];
Fp6S = [Fp6x; Fp6y; Fp6z];
Fp7S = [Fp7x; Fp7y; Fp7z];
Fp8S = [Fp8x; Fp8y; Fp8z];
gS = [0; g; 0];
syms AaRAx AaRAy AaRAz AaRBx AaRBy AaRBz AaRCx AaRCy AaRCz AaREx
AaREy AaREz AaRGx AaRGy AaRGz
AaRAS = [AaRAx; AaRAy; AaRAz];
AaRBS = [AaRBx; AaRBy; AaRBz];
AaRCS = [AaRCx; AaRCy; AaRCz];
AaRES = [AaREx; AaREy; AaREz];
AaRGS = [AaRGx; AaRGy; AaRGz];
% SUMATORIA DE FUERZAS - ECUACIONES
EQ1 = -Fp1S + Fp2S + Fp5S - mRAS*gS == mRAS*AaRAS;
EQ2 = -Fp2S + Fp3S + Fp4S - mRBS*gS == mRBS*AaRBS;
EQ3 = -Fp3S + Fp7S - mRES*gS == mRES*AaRES;
EQ4 = -Fp4S + Fp6S - mRCS*gS == mRCS*AaRCS;
EQ5 = -Fp5S + Fp8S - mRGS*gS == mRGS*AaRGS;
% SUMATORIA DE MOMENTOS - PARAMETROS
syms ArPAP1x ArPAP1y ArPAP1z ArPAP2x ArPAP2y ArPAP2z ArPAP5x
ArPAP5y ArPAP5z ArPBP3x ArPBP3y ArPBP3z ArPBP4x ArPBP4y ArPBP4z
ArPCP4x ArPCP4y ArPCP4z
syms ArPCP6x ArPCP6y ArPCP6z ArPEP3x ArPEP3y ArPEP3z ArPEP7x
ArPEP7y ArPEP7z ArPGP5x ArPGP5y ArPGP5z ArPGP8x ArPGP8y ArPGP8z
ArPAP1S = [ArPAP1x; ArPAP1y; ArPAP1z];
ArPAP2S = [ArPAP2x; ArPAP2y; ArPAP2z];
ArPAP5S = [ArPAP5x; ArPAP5y; ArPAP5z];
ArPBP3S = [ArPBP3x; ArPBP3y; ArPBP3z];
ArPBP4S = [ArPBP4x; ArPBP4y; ArPBP4z];
ArPCP4S = [ArPCP4x; ArPCP4y; ArPCP4z];
ArPCP6S = [ArPCP6x; ArPCP6y; ArPCP6z];
ArPEP3S = [ArPEP3x; ArPEP3y; ArPEP3z];
ArPEP7S = [ArPEP7x; ArPEP7y; ArPEP7z];

```

```

ArPGP5S = [ArPGP5x; ArPGP5y; ArPGP5z];
ArPGP8S = [ArPGP8x; ArPGP8y; ArPGP8z];
syms OpAx OpAy OpAz OpBx OpBy OpBz OpCx OpCy OpCz OpEx OpEy OpEz
OpGx OpGy OpGz
OpAS = [OpAx; OpAy; OpAz];
OpBS = [OpBx; OpBy; OpBz];
OpCS = [OpCx; OpCy; OpCz];
OpES = [OpEx; OpEy; OpEz];
OpGS = [OpGx; OpGy; OpGz];
syms O2pAx O2pAy O2pAz O2pBx O2pBy O2pBz O2pCx O2pCy O2pCz O2pEx
O2pEy O2pEz O2pGx O2pGy O2pGz
O2pAS = [O2pAx; O2pAy; O2pAz];
O2pBS = [O2pBx; O2pBy; O2pBz];
O2pCS = [O2pCx; O2pCy; O2pCz];
O2pES = [O2pEx; O2pEy; O2pEz];
O2pGS = [O2pGx; O2pGy; O2pGz];
syms Iaa11 Iaa12 Iaa13 Iaa21 Iaa22 Iaa23 Iaa31 Iaa32 Iaa33
IaaS = [Iaa11 Iaa12 Iaa13;
        Iaa21 Iaa22 Iaa23;
        Iaa31 Iaa32 Iaa33];
syms Ibb11 Ibb12 Ibb13 Ibb21 Ibb22 Ibb23 Ibb31 Ibb32 Ibb33
IbbS = [Ibb11 Ibb12 Ibb13;
        Ibb21 Ibb22 Ibb23;
        Ibb31 Ibb32 Ibb33];
syms Icc11 Icc12 Icc13 Icc21 Icc22 Icc23 Icc31 Icc32 Icc33
IccS = [Icc11 Icc12 Icc13;
        Icc21 Icc22 Icc23;
        Icc31 Icc32 Icc33];
syms Iee11 Iee12 Iee13 Iee21 Iee22 Iee23 Iee31 Iee32 Iee33
IeeS = [Iee11 Iee12 Iee13;
        Iee21 Iee22 Iee23;
        Iee31 Iee32 Iee33];
syms Igg11 Igg12 Igg13 Igg21 Igg22 Igg23 Igg31 Igg32 Igg33
IggS = [Igg11 Igg12 Igg13;
        Igg21 Igg22 Igg23;
        Igg31 Igg32 Igg33];
% SUMATORIA DE MOMENTOS - ECUACIONES
MA = cross(-Fp1S,ArPAP1S)+cross(Fp2S,ArPAP2S)+cross(Fp5S,ArPAP5S);
MA1 = IaaS*O2pAS+cross(OpAS, IaaS*OpAS);

MB = cross(Fp3S,ArPBP3S)+cross(Fp4S,ArPBP4S);
MB1 = IbbS*O2pBS+cross(OpBS, IbbS*OpBS);

MC = cross(-Fp4S,ArPCP4S)+cross(Fp6S,ArPCP6S);
MC1 = IccS*O2pCS+cross(OpCS, IccS*OpCS);

ME = cross(-Fp3S,ArPEP3S)+cross(Fp7S,ArPEP7S);

```

```

ME1 = Iees*O2pES+cross(OpES, Iees*OpES);

MG = cross(-Fp5S,ArPGP5S)+cross(Fp8S,ArPGP8S);
MG1 = IggS*O2pGS+cross(OpGS, IggS*OpGS);
% SUMATORIA DE MOMENTOS - REDUCCIÓN DE ECUACIONES
EQ6 = MA == MA1;
EQ7 = MB == MB1;
EQ8 = MC == MC1;
EQ9 = ME == ME1;
EQ10 = MG == MG1;
% ECUACIONES DE FUERZAS Y MOMENTOS DEL CUERPO A
EQ1
EQ6
% ECUACIONES DE FUERZAS Y MOMENTOS DEL CUERPO B
EQ2
EQ7
% ECUACIONES DE FUERZAS Y MOMENTOS DEL CUERPO C
EQ3
EQ8
% ECUACIONES DE FUERZAS Y MOMENTOS DEL CUERPO E
EQ4
EQ9
% ECUACIONES DE FUERZAS Y MOMENTOS DEL CUERPO G
EQ5
EQ10
%% LEER DATOS DE LA SIMULACIÓN
% Para inciar con el codigo necesitamos que el usuario manualmente
cargue
% los datos dados por la simulación en solidworks. Donde las
variables se
% tienen definidas como:
% t      Variable para tiempo
long_t = length(t);
% px     %Variable para posición en "X" del punto P0
% py     %Variable para posición en "Y" del punto P0
% pz     %Variable para posición en "Z" del punto P0
% vx     %Variable para velocidad en "X" del punto P0
% vy     %Variable para velocidad en "Y" del punto P0
% vz     %Variable para velocidad en "Z" del punto P0
% ax     %Variable para aceleración en "X" del punto P0
% ay     %Variable para aceleración en "Y" del punto P0
% az     %Variable para aceleración en "Z" del punto P0
% ThetaAz      Variable para posición angular del ROCKER
% ThetaAPz     Variable para velocidad angular del ROCKER
% ThetaA2Pz    Variable para aceleración angular del ROCKER
% ThetaBz      Variable para posición angular del BOGIE
% ThetaBPz     Variable para velocidad angular del BOGIE
% ThetaB2Pz    Variable para aceleración angular del BOGIE

```

```

OP = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),zeros(long_t,1)];
%Variable para posición angular de la placa
OA = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),ThetaAz];
%Variable para posición angular del ROCKER
OpA = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),ThetaAPz];
%Variable para velocidad angular del ROCKER
O2pA = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),ThetaA2Pz];
%Variable para aceleración angular del ROCKER
OB = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),ThetaBz];
%Variable para posición angular del BOGIE
OpB = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),ThetaBPz];
%Variable para velocidad angular del BOGIE
O2pB = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),ThetaB2Pz];
%Variable para aceleración angular del BOGIE
OC = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),zeros(long_t,1)];
%Variable para posición angular de la primera "C"
OpC = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),zeros(long_t,1)];
%Variable para velocidad angular de la primera "C"
O2pC = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),zeros(long_t,1)];
%Variable para aceleración angular de la primera "C"
OE = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),zeros(long_t,1)];
%Variable para posición angular de la segunda "C"
OpE = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),zeros(long_t,1)];
%Variable para velocidad angular de la segunda "C"
O2pE = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),zeros(long_t,1)];
%Variable para aceleración angular de la segunda "C"
OG = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),zeros(long_t,1)];
%Variable para posición angular de la tercera "C"
OpG = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),zeros(long_t,1)];
%Variable para velocidad angular de la tercera "C"
O2pG = [zeros(long_t,1),zeros(long_t,1),zeros(long_t,1)];
%Variable para aceleración angular de la tercera "C"
pz = zeros(long_t,1);
g = 9.80665;
%GRAVEDAD
ang_brazo_antivolcadura = 5; %Angulo
entre la vertical y el punto de contacto llanta suelo
% PARAMETROS DEL VEHICULO
% En este apartado se encuentran los parametros de distancias
establecidos anteriormente en el diseño del mismo.
lp = 0.4; %Longitud de la placa
lr = 0.47; %Longitud del rocker
lsr = 0.325; %Longitud superior del rocker
lb = 0.3; %Longitud del bogie
lrb = 0.06; %Longitud entre el centro del rocker y del
bogie
h = 0.15; %Altura del rocker
hc = 0.4; %Altura de las C's

```

```

r = 0.065;           %Radio de las llantas
lxA = 0.07504;      %Longitud del centroide del rocker hasta el
punto P1 en "X"
lyA = 0.05688;      %Longitud del centroide del rocker hasta el
punto P1 en "Y"
lzA = 0.0082;       %Longitud del centroide del rocker hasta el
punto P1 en "Z"
lxB = 0;            %Longitud del centroide del bogie hasta el
punto P2 en "X"
lyB = 0;            %Longitud del centroide del bogie hasta el
punto P2 en "Y"
lzB = 0.03836;      %Longitud del centroide del bogie hasta el
punto P2 en "Z"
lxC = 0;            %Longitud del centroide de la C con nombre C
hasta el punto P4 en "X"
lyC = 0.14402;      %Longitud del centroide de la C con nombre C
hasta el punto P4 en "Y"
lzC = 0.00188;      %Longitud del centroide de la C con nombre C
hasta el punto P4 en "Z"
lxE = 0;            %Longitud del centroide de la C con nombre E
hasta el punto P3 en "X"
lyE = 0.14402;      %Longitud del centroide de la C con nombre E
hasta el punto P3 en "Y"
lzE = 0.00188;      %Longitud del centroide de la C con nombre E
hasta el punto P3 en "Z"
lxG = 0;            %Longitud del centroide de la C con nombre G
hasta el punto P5 en "X"
lyG = 0.14402;      %Longitud del centroide de la C con nombre G
hasta el punto P5 en "Y"
lzG = 0.00188;      %Longitud del centroide de la C con nombre G
hasta el punto P5 en "Z"
% MATRICES DE INERCIA DE LOS COMPONENTES
Iaa = [0.00211757 0.00310113 -0.00051361;
        0.00310113 0.02696491 -0.00025748;
        -0.00051361 -0.00025748 0.02826327]; % Matriz de
inercia del Rocker
Ibb = [0.00074407 -0.00000014 0.00000024;
        -0.00000014 0.01641905 0.00000116;
        0.00000024 0.00000116 0.01590536]; %Matriz de inercia
del Bogie
Icc = [0.02725388 0.00096921 0.00000000;
        0.00096921 0.01288806 0.00000000;
        0.00000000 0.00000000 0.03969836]; %Matriz de inercia
de las C's
Iee = Icc;
Igg = Icc;
% MASA DE LOS COMPONENTES
m_carga = 6.25; %Masa de la carga

```

```

mP = 11.3/2;           %Masa de la placa
mRA = 0.86571;        %Masa del rocker
mRB = 0.88035;        %Masa del Bogie
mRC = 2.5969;         %Masa de la C con nombre C
mRE = 2.5969;         %Masa de la C con nombre E
mRG = 2.5969;         %Masa de la C con nombre G
% REGISTRO DE LOS TORQUES PARA FILTRADO
Tm1_1 = 0;Tm1_2 = 0;Tm1_3 = 0;Tm1_4 = 0;Tm1_5 = 0;Tm1_6 = 0;Tm1_7 =
0;Tm1_8 = 0;Tm1_9 = 0;
Tm1_10 = 0;Tm1_11 = 0;Tm1_12 = 0;Tm1_13 = 0;Tm1_14 = 0;Tm1_15 =
0;Tm1_16 = 0;Tm1_17 = 0;Tm1_18 = 0;Tm1_19 = 0;
Tm2_1 = 0;Tm2_2 = 0;Tm2_3 = 0;Tm2_4 = 0;Tm2_5 = 0;Tm2_6 = 0;Tm2_7 =
0;Tm2_8 = 0;Tm2_9 = 0;
Tm2_10 = 0;Tm2_11 = 0;Tm2_12 = 0;Tm2_13 = 0;Tm2_14 = 0;Tm2_15 =
0;Tm2_16 = 0;Tm2_17 = 0;Tm2_18 = 0;Tm2_19 = 0;
Tm3_1 = 0;Tm3_2 = 0;Tm3_3 = 0;Tm3_4 = 0;Tm3_5 = 0;Tm3_6 = 0;Tm3_7 =
0;Tm3_8 = 0;Tm3_9 = 0;
Tm3_10 = 0;Tm3_11 = 0;Tm3_12 = 0;Tm3_13 = 0;Tm3_14 = 0;Tm3_15 =
0;Tm3_16 = 0;Tm3_17 = 0;Tm3_18 = 0;Tm3_19 = 0;
% BUCLE
for i=1:long_t
tac = t(i);
% DATOS DESCRIPCION DEL MOVIMIENTO
O1(i) = OA(i,3) - OP(i,3); %Desde P hasta A
O2(i) = OB(i,3) - OA(i,3); %Desde A hasta B
O3(i) = OB(i,2) - OC(i,2); %Desde B hasta C
O4(i) = OB(i,2) - OE(i,2); %Desde B hasta E
O5(i) = OA(i,2) - OG(i,2); %Desde A hasta G
% COSENOS DE LOS ANGULOS ANTERIORES
C1 = cos(O1(i));
C2 = cos(O2(i));
C3 = cos(O3(i));
C4 = cos(O4(i));
C5 = cos(O5(i));
% SENOS DE LOS ANGULOS ANTERIORES
S1 = sin(O1(i));
S2 = sin(O2(i));
S3 = sin(O3(i));
S4 = sin(O4(i));
S5 = sin(O5(i));
% MATRICES DE ROTACIÓN
% AcP == Matriz de conversión del sistema de referencia P al
sistema de referencia A
AcP = [C1 -S1 0;
       S1 C1 0 ;
       0 0 1];
BcA = [C2 -S2 0;
       S2 C2 0;

```



```

    0  0 1];
CcB = [C3 0 S3;
       0 1 0 ;
       -S3 0 C3];
EcB = [C4 0 S4;
       0 1 0 ;
       -S4 0 C4];
GcA = [C5 0 S5;
       0 1 0 ;
       -S5 0 C5];
AcB = BcA';
BcC = CcB';
BcE = EcB';
AcG = GcA';
PcA = AcP';
% POSICIONES
% % Pendiente por incluir aun no son necesarias
% PrP0 == En el sistema de referencia P la posición del punto P0
% PUNTOS CLAVES
% PARA IR AL PUNTO P7
PrP0(i,:) = [px(i) py(i) pz(i)];           %Vector posición de
P0 en P
ArP1(i,:) = PrP0(i,:)*AcP + [0 0 lp/2]*AcP; %Vector posición de
P1 en A
PrP1(i,:) = ArP1(i,:)*PcA;                %Vector posición de
P1 en P
ArP2(i,:) = ArP1(i,:) + [lr/2 -h lrb];     %Vector posición de
P2 en A
PrP2(i,:) = ArP2(i,:)*PcA;                %Vector posición de
P2 en P
BrP2(i,:) = ArP2(i,:)*BcA;                %Vector posición de
P2 en B
BrP3(i,:) = BrP2(i,:) + [-lb/2 0 -lzB];   %Vector posición de
P3 en B
ArP3(i,:) = BrP3(i,:)*AcB;                %Vector posición de
P3 en A
PrP3(i,:) = ArP3(i,:)*PcA;                %Vector posición de
P3 en P
ErP3(i,:) = BrP3(i,:)*EcB;                %Vector posición de
P3 en E
ErP7(i,:) = ErP3(i,:) + [0 -hc 0];        %Vector posición de
P7 en E
BrP7(i,:) = ErP7(i,:)*BcE;                %Vector posición de
P7 en B
ArP7(i,:) = BrP7(i,:)*AcB;                %Vector posición de
P7 en A
PrP7(i,:) = ArP7(i,:)*PcA;                %Vector posición de
P7 en P

```

```

% PARA IR AL PUNTO P6
BrP4(i,:) = BrP2(i,:) + [lb/2 0 -lzB];           %Vector posición de
P4 en B
ArP4(i,:) = BrP4(i, :)*AcB;                     %Vector posición de
P4 en A
PrP4(i,:) = ArP4(i, :)*PcA;                     %Vector posición de
P4 en P
CrP4(i,:) = BrP4(i, :)*CcB;                     %Vector posición de
P4 en C
CrP6(i,:) = CrP4(i, :) + [0 -hc 0];            %Vector posición de
P6 en C
BrP6(i,:) = CrP6(i, :)*BcC;                     %Vector posición de
P6 en B
ArP6(i,:) = BrP6(i, :)*AcB;                     %Vector posición de
P6 en A
PrP6(i,:) = ArP6(i, :)*PcA;                     %Vector posición de
P6 en P
% PARA IR AL PUNTO P8
ArP5(i,:) = ArP1(i, :) + [-lr/2 -h -lzB];      %Vector posición de
P5 en A
PrP5(i,:) = ArP5(i, :)*PcA;                     %Vector posición de
P5 en P
GrP5(i,:) = ArP5(i, :)*GcA;                     %Vector posición de
P5 en G
GrP8(i,:) = GrP5(i, :) + [0 -hc 0];            %Vector posición de
P8 en G
ArP8(i,:) = GrP8(i, :)*AcG;                     %Vector posición de
P8 en A
PrP8(i,:) = ArP8(i, :)*PcA;                     %Vector posición de
P8 en P
% PUNTOS PARA DIBUJAR EL MECANISMO
ArPI1(i,:) = ArP1(i, :) + [lsr/2 0 0];
ArPI2(i,:) = ArP1(i, :) + [-lsr/2 0 0];
PrPI1(i,:) = ArPI1(i, :)*PcA;
PrPI2(i,:) = ArPI2(i, :)*PcA;
% PUNTOS CLAVES DESDE EL CENTROIDE DEL CUERPO
% ArPAP1 == El vector posición desde el centroide del cuerpo A
hasta el punto P1 en el sistema de referencia A
ArPAP1(i,:) = [lxA lyA lzA];                    %Vector posición
del centroide del cuerpo A la punto P1 en el sistema de referencia
A
ArPAP2(i,:) = ArPAP1(i, :) + [lr/2 -h lzA];    %Vector posición
del centroide del cuerpo A la punto P2 en el sistema de referencia
A
ArPAP5(i,:) = ArPAP1(i, :) + [-lr/2 -h lzA];   %Vector posición
del centroide del cuerpo A la punto P5 en el sistema de referencia
A

```

```

BrPBP3(i,:) = [-lb/2 lyB -lzB];           %Vector posicion
del centroide del cuerpo B la punto P3 en el sistema de referencia
B
ArPBP3(i,:) = BrPBP3(i,:)*AcB;           %Vector posicion
del centroide del cuerpo B la punto P3 en el sistema de referencia
A
BrPBP4(i,:) = [lb/2 lyB -lzB];           %Vector posicion
del centroide del cuerpo B la punto P4 en el sistema de referencia
B
ArPBP4(i,:) = BrPBP4(i,:)*AcB;           %Vector posicion
del centroide del cuerpo B la punto P4 en el sistema de referencia
A
CrPCP4(i,:) = [0 lyC -lzC];             %Vector posicion
del centroide del cuerpo C la punto P4 en el sistema de referencia
C
ArPCP4(i,:) = CrPCP4(i,:)*BcC*AcB;      %Vector posicion
del centroide del cuerpo C la punto P4 en el sistema de referencia
A
CrPCP6(i,:) = CrPCP4(i,:) + [0 -hc 0];   %Vector posicion
del centroide del cuerpo C la punto P6 en el sistema de referencia
C
ArPCP6(i,:) = CrPCP6(i,:)*BcC*AcB;      %Vector posicion
del centroide del cuerpo C la punto P6 en el sistema de referencia
A
ErPEP3(i,:) = [0 lyE -lzE];             %Vector posicion
del centroide del cuerpo E la punto P3 en el sistema de referencia
E
ArPEP3(i,:) = ErPEP3(i,:)*BcE*AcB;      %Vector posicion
del centroide del cuerpo E la punto P3 en el sistema de referencia
A
ErPEP7(i,:) = ErPEP3(i,:) + [0 -hc 0];   %Vector posicion
del centroide del cuerpo E la punto P7 en el sistema de referencia
E
ArPEP7(i,:) = ErPEP7(i,:)*BcE*AcB;      %Vector posicion
del centroide del cuerpo E la punto P7 en el sistema de referencia
A
GrPGP5(i,:) = [0 lyG -lzG];             %Vector posicion
del centroide del cuerpo G la punto P5 en el sistema de referencia
G
ArPGP5(i,:) = GrPGP5(i,:)*AcG;           %Vector posicion
del centroide del cuerpo G la punto P5 en el sistema de referencia
A
GrPGP8(i,:) = GrPGP5(i,:) + [0 -hc 0];   %Vector posicion
del centroide del cuerpo G la punto P8 en el sistema de referencia
G
ArPGP8(i,:) = GrPGP8(i,:)*AcG;           %Vector posicion
del centroide del cuerpo G la punto P8 en el sistema de referencia
A

```

```

% GRAFICACIÓN DEL MECANISMO
figure(1)
title('SIMULACIÓN DE MOVIMIENTO')
cla;
xlim([0 4]);
ylim([-0.2 3.8]);
% DIBUJO DE LA TRAYECTORIA DE LOS PUNTOS P1, P6, P7 Y P8
plot(PrP8(:,1),PrP8(:,2), 'k')
plot(PrP7(:,1),PrP7(:,2), 'k')
plot(PrP6(:,1),PrP6(:,2), 'k')
plot(PrP1(:,1),PrP1(:,2), 'k')
% DIBUJO DEL ROCKER
plot([PrP1(i,1) PrPI1(i,1)], [PrP1(i,2) PrPI1(i,2)], 'r')
plot([PrPI1(i,1) PrP2(i,1)], [PrPI1(i,2) PrP2(i,2)], 'r')
plot([PrP1(i,1) PrPI2(i,1)], [PrP1(i,2) PrPI2(i,2)], 'r')
plot([PrPI2(i,1) PrP5(i,1)], [PrPI2(i,2) PrP5(i,2)], 'r')
% DIBUJO DEL BOGIE
plot([PrP2(i,1) PrP3(i,1)], [PrP2(i,2) PrP3(i,2)], 'b')
plot([PrP2(i,1) PrP4(i,1)], [PrP2(i,2) PrP4(i,2)], 'b')
% DIBUJO DE LA C CON NOMBRE C
plot([PrP3(i,1) PrP7(i,1)], [PrP3(i,2) PrP7(i,2)], 'r')
% DIBUJO DE LA C CON NOMBRE E
plot([PrP4(i,1) PrP6(i,1)], [PrP4(i,2) PrP6(i,2)], 'r')
% DIBUJO DE LA C CON NOMBRE G
plot([PrP5(i,1) PrP8(i,1)], [PrP5(i,2) PrP8(i,2)], 'b')
% DIBUJO LLANTAS
% viscircles([PrP6(i,1) PrP6(i,2)],r)
% viscircles([PrP7(i,1) PrP7(i,2)],r)
% viscircles([PrP8(i,1) PrP8(i,2)],r)
% DIBUJOS PUNTOS IMPORTANTES
viscircles([PrP1(i,1) PrP1(i,2)],0.005,'Color','black');
viscircles([PrP2(i,1) PrP2(i,2)],0.005,'Color','black');
viscircles([PrP3(i,1) PrP3(i,2)],0.005,'Color','black');
viscircles([PrP4(i,1) PrP4(i,2)],0.005,'Color','black');
viscircles([PrP5(i,1) PrP5(i,2)],0.005,'Color','black');
viscircles([PrP6(i,1) PrP6(i,2)],0.005,'Color','black');
viscircles([PrP7(i,1) PrP7(i,2)],0.005,'Color','black');
viscircles([PrP8(i,1) PrP8(i,2)],0.005,'Color','black');
% TITULO DE EJES
ylabel('Desplazamiento (m)')
xlabel('Desplazamiento (m)')
hold on; %Mantener la ventana de la figura 1 abierta
pause(0.01); %Pausa en la simulación para ver el recorrido
% VELOCIDADES
% PvP0 == En el sistema de referencia P la velocidad del punto P0
PvP0(i,:) = [vx(i) vy(i) vz(i)]; %Vector de
velocidad del punto P0 en P

```

```

AvP1(i,:) = PvP0(i,:)*AcP; %Vector de
velocidad del punto P1 en A
AvP2(i,:) = AvP1(i,:) + [h (lr/2) 0]*OpA(i,3); %Vector de
velocidad del punto P2 en A
BvP2(i,:) = AvP2(i,:)*AcB; %Vector de
velocidad del punto P2 en B
BvP3(i,:) = BvP2(i,:) + [0 -lb/2 0]*OpB(i,3); %Vector de
velocidad del punto P3 en B
BvP4(i,:) = BvP2(i,:) + [0 lb/2 0]*OpB(i,3); %Vector de
velocidad del punto P4 en B
AvP5(i,:) = AvP2(i,:) + [h -lr/2 0]*OpA(i,3); %Vector de
velocidad del punto P5 en A
CvP4(i,:) = BvP4(i,:)*BcC; %Vector de
velocidad del punto P4 en C
CvP6(i,:) = CvP4(i,:); %Vector de
velocidad del punto P6 en C
EvP3(i,:) = BvP3(i,:)*BcE; %Vector de
velocidad del punto P3 en E
EvP7(i,:) = EvP3(i,:); %Vector de
velocidad del punto P7 en E
GvP5(i,:) = AvP5(i,:)*AcG; %Vector de
velocidad del punto P5 en G
GvP8(i,:) = GvP5(i,:); %Vector de
velocidad del punto P8 en G
% ACELERACIONES
% PaP0 == Vector de aceleracion del punto P0 en el sistema de
referencia P
PaP0(i,:) = [ax(i) ay(i) az(i)];
%Vector de aceleracion del punto P0 en P
PaP1(i,:) = PaP0(i,:);
%Vector de aceleracion del punto P1 en P
AaP1(i,:) = PaP1(i,:)*AcP;
%Vector de aceleracion del punto P1 en A
AaP2(i,:) = AaP1(i,:) + O2pA(i,3)*[h lr/2 0] + (OpA(i,3)^2)*[-lr/2
h 0]; %Vector de aceleracion del punto P2 en A
AaP5(i,:) = AaP1(i,:) + O2pA(i,3)*[h -lr/2 0] + (OpA(i,3)^2)*[lr/2
h 0]; %Vector de aceleracion del punto P5 en A
BaP2(i,:) = AaP2(i,:)*BcA;
%Vector de aceleracion del punto P2 en B
BaP3(i,:) = BaP2(i,:) + O2pB(i,3)*[0 lb/2 0] + (OpB(i,3)^2)*[lb/2 0
0]; %Vector de aceleracion del punto P3 en B
BaP4(i,:) = BaP2(i,:) + O2pB(i,3)*[0 lb/2 0] + (OpB(i,3)^2)*[-lb/2
0 0]; %Vector de aceleracion del punto P4 en B
EaP3(i,:) = BaP3(i,:)*EcB;
%Vector de aceleracion del punto P3 en E
CaP4(i,:) = BaP4(i,:)*CcB;
%Vector de aceleracion del punto P4 en C

```

```

GaP5(i,:) = AaP5(i, :)*GcA;
%Vector de aceleracion del punto P5 en G
CaP6(i,:) = CaP4(i, :);
%Vector de aceleracion del punto P6 en C
EaP7(i,:) = EaP3(i, :);
%Vector de aceleracion del punto P7 en E
GaP8(i,:) = GaP5(i, :);
%Vector de aceleracion del punto P8 en G
AaRA(i,:) = AaP1(i, :) + O2pA(i,3)*[lyA lxA 0] + (OpA(i,3)^2)*[-lxA
lyA 0]; %Vector de aceleracion del punto centroide del cuerpo A en
A
BaRB(i,:) = BaP2(i, :);
%Vector de aceleracion del punto centroide del cuerpo B en B
AaRB(i,:) = BaRB(i, :)*AcB;
%Vector de aceleracion del punto centroide del cuerpo B en A
CaRC(i,:) = CaP4(i, :) + O2pC(i,2)*[lzC 0 0] + (OpC(i,2)^2)*[0 0
lzC]; %Vector de aceleracion del punto centroide del cuerpo C
en C
AaRC(i,:) = CaRC(i, :)*BcC*AcB;
%Vector de aceleracion del punto centroide del cuerpo C en A
EaRE(i,:) = EaP3(i, :) + O2pE(i,2)*[lzE 0 0] + (OpC(i,2)^2)*[0 0
lzE]; %Vector de aceleracion del punto centroide del cuerpo E
en E
AaRE(i,:) = EaRE(i, :)*BcE*AcB;
%Vector de aceleracion del punto centroide del cuerpo E en A
GaRG(i,:) = GaP5(i, :) + O2pG(i,2)*[lzG 0 0] + (OpG(i,2)^2)*[0 0
lzG]; %Vector de aceleracion del punto centroide del cuerpo G
en G
AaRG(i,:) = GaRG(i, :)*AcG;
%Vector de aceleracion del punto centroide del cuerpo G en A
% ECUACIONES NUMERICAS
% OBTENCIÓN DE DATOS PARA CALCULAR
% DISTANCIA ENTRE EL CENTROIDE Y LOS PUNTOS PRINCIPALES
ArPAP1x = ArPAP1(i, 1);
ArPAP1y = ArPAP1(i, 2);
ArPAP1z = ArPAP1(i, 3);
ArPAP2x = ArPAP2(i, 1);
ArPAP2y = ArPAP2(i, 2);
ArPAP2z = ArPAP2(i, 3);
ArPAP5x = ArPAP5(i, 1);
ArPAP5y = ArPAP5(i, 2);
ArPAP5z = ArPAP5(i, 3);
ArPBP3x = ArPBP3(i, 1);
ArPBP3y = ArPBP3(i, 2);
ArPBP3z = ArPBP3(i, 3);
ArPBP4x = ArPBP4(i, 1);
ArPBP4y = ArPBP4(i, 2);
ArPBP4z = ArPBP4(i, 3);

```

```

ArPCP4x = ArPCP4(i,1);
ArPCP4y = ArPCP4(i,2);
ArPCP4z = ArPCP4(i,3);
ArPCP6x = ArPCP6(i,1);
ArPCP6y = ArPCP6(i,2);
ArPCP6z = ArPCP6(i,3);
ArPEP3x = ArPEP3(i,1);
ArPEP3y = ArPEP3(i,2);
ArPEP3z = ArPEP3(i,3);
ArPEP7x = ArPEP3(i,1);
ArPEP7y = ArPEP3(i,2);
ArPEP7z = ArPEP3(i,3);
ArPGP5x = ArPGP5(i,1);
ArPGP5y = ArPGP5(i,2);
ArPGP5z = ArPGP5(i,3);
ArPGP8x = ArPGP8(i,1);
ArPGP8y = ArPGP8(i,2);
ArPGP8z = ArPGP8(i,3);
% ACELERACION DE LOS CENTROIDES DE LOS CUERPOS
AaRAx = AaRA(i,1);
AaRAy = AaRA(i,2);
AaRAz = AaRA(i,3);
AaRBx = AaRB(i,1);
AaRBy = AaRB(i,2);
AaRBz = AaRB(i,3);
AaRCx = AaRC(i,1);
AaRCy = AaRC(i,2);
AaRCz = AaRC(i,3);
AaREx = AaRE(i,1);
AaREy = AaRE(i,2);
AaREz = AaRE(i,3);
AaRGx = AaRG(i,1);
AaRGy = AaRG(i,2);
AaRGz = AaRG(i,3);
% VELOCIDADES ANGULARES DE LOS CUERPOS
OpAx = OpA(i,1);
OpAy = OpA(i,2);
OpAz = OpA(i,3);
OpBx = OpB(i,1);
OpBy = OpB(i,2);
OpBz = OpB(i,3);
OpCx = OpC(i,1);
OpCy = OpC(i,2);
OpCz = OpC(i,3);
OpEx = OpE(i,1);
OpEy = OpE(i,2);
OpEz = OpE(i,3);
OpGx = OpG(i,1);

```

```

OpGy = OpG(i,2);
OpGz = OpG(i,3);
% ACELERACIONES ANGULARES DE LOS CUERPOS
O2pAx = O2pA(i,1);
O2pAy = O2pA(i,2);
O2pAz = O2pA(i,3);
O2pBx = O2pB(i,1);
O2pBy = O2pB(i,2);
O2pBz = O2pB(i,3);
O2pCx = O2pC(i,1);
O2pCy = O2pC(i,2);
O2pCz = O2pC(i,3);
O2pEx = O2pE(i,1);
O2pEy = O2pE(i,2);
O2pEz = O2pE(i,3);
O2pGx = O2pG(i,1);
O2pGy = O2pG(i,2);
O2pGz = O2pG(i,3);
% OBTENCION DE LOS PARAMETROS DE LAS MATRICES DE INERCIA
Iaa11 = Iaa(1,1);
Iaa12 = Iaa(1,2);
Iaa13 = Iaa(1,3);
Iaa21 = Iaa(2,1);
Iaa22 = Iaa(2,2);
Iaa23 = Iaa(2,3);
Iaa31 = Iaa(3,1);
Iaa32 = Iaa(3,2);
Iaa33 = Iaa(3,3);
Ibb11 = Ibb(1,1);
Ibb12 = Ibb(1,2);
Ibb13 = Ibb(1,3);
Ibb21 = Ibb(2,1);
Ibb22 = Ibb(2,2);
Ibb23 = Ibb(2,3);
Ibb31 = Ibb(3,1);
Ibb32 = Ibb(3,2);
Ibb33 = Ibb(3,3);
Icc11 = Icc(1,1);
Icc12 = Icc(1,2);
Icc13 = Icc(1,3);
Icc21 = Icc(2,1);
Icc22 = Icc(2,2);
Icc23 = Icc(2,3);
Icc31 = Icc(3,1);
Icc32 = Icc(3,2);
Icc33 = Icc(3,3);
Iee11 = Iee(1,1);
Iee12 = Iee(1,2);

```



```

Iee13 = Iee(1,3);
Iee21 = Iee(2,1);
Iee22 = Iee(2,2);
Iee23 = Iee(2,3);
Iee31 = Iee(3,1);
Iee32 = Iee(3,2);
Iee33 = Iee(3,3);
Igg11 = Igg(1,1);
Igg12 = Igg(1,2);
Igg13 = Igg(1,3);
Igg21 = Igg(2,1);
Igg22 = Igg(2,2);
Igg23 = Igg(2,3);
Igg31 = Igg(3,1);
Igg32 = Igg(3,2);
Igg33 = Igg(3,3);
% FUERZA CONOCIDA EN EL PUNTO P1
FP1x = 0;
FP1y = (m_carga + mP)*g;
FP1z = 0;
% ECUACIONES UNIFICADAS EN LA MATRIZ
% MATRIZ DE INCOGNITAS
%      1      2      3      4      5      6      7      8
9      10     11     12     13     14     15     16     17
18     19     20     21
%      Fp2x     Fp2y     Fp2z     Fp3x     Fp3y     Fp3z     Fp4x     Fp4y
Fp4z     Fp5x     Fp5y     Fp5z     Fp6x     Fp6y     Fp6z     Fp7x
Fp7y     Fp7z     Fp8x     Fp8y     Fp8z
A = [1      0      0      0      0      0      0      0
0      1      0      0      0      0      0      0
0      0      0      0;
0      0      1      0      0      0      0      0
0      0      1      0      0      0      0      0
0      0      0      1;
0      0      0      1      0      0      0      0
0      0      0      0;
0      -1     0      0      1      0      0      1
0      0      0      0      0      0      0      0
0      0      0      0;
0      0     -1     0      0      1      0      1
0      0      0      0      0      0      0      0
0      0      0      0;
1      0      0      0      0      0      0      0
0      0      0      0;

```

	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0;							
	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0;							
	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0;							
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0;							
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0;							
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0;							
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0;							
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0;							
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1;								
	0	-ArPAP2z	ArPAP2y	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-ArPAP5z	ArPAP5y	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0;									
	ArPAP2z	0	-ArPAP2x	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	ArPAP5z	0	-ArPAP5x	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0;									
	-ArPAP2y	ArPAP2x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-ArPAP5y	ArPAP5x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0;									
	0	0	0	0	0	-ArPBP3z	ArPBP3y	0	-ArPBP4z			
ArPBP4y	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
0	0	0	0	0	0;							
	0	0	0	ArPBP3z	0	-ArPBP3x	ArPBP4z	0	-			
ArPBP4x	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
0	0	0	0	0	0;							
	0	0	0	-ArPBP3y	ArPBP3x	0	-ArPBP4y	ArPBP4x				
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
0	0	0	0	0;								
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-ArPCP4z		
ArPCP4y	0	0	0	0	0	0	-ArPCP6z	ArPCP6y	0			
0	0	0	0	0	0;							

```

0      0      0      0      0      0      ArPCP4z  0  -
ArPCP4x  0      0      0      0      ArPCP6z  0  -ArPCP6x  0
0      0      0      0      0      0;
0      0      0      0      0      0      0      -ArPCP4y  ArPCP4x
0      0      0      0      0      -ArPCP6y  ArPCP6x  0      0      0
0      0      0      0      0      0;
0      0      0      0      0      0      -ArPEP3z  ArPEP3y  0      0
ArPEP7y  0      0      0      0      0      0      0      0      -ArPEP7z
0      0      0      0      ArPEP3z  0      -ArPEP3x  0      0
-ArPEP7x  0      0      0      0      0      0      0      ArPEP7z  0
0      0      0      0      -ArPEP3y  ArPEP3x  0      0      0
ArPEP7x  0      0      0      0      0      0      0      -ArPEP7y
0      0      0      0      0      0;
0      0      -ArPGP5z  ArPGP5y  0      0      0      0      0
0      0      -ArPGP8z  ArPGP8y;
0      0      0      0      0      0      0      0      0
0      ArPGP5z  0      -ArPGP5x  0      0      0      0      0
0      ArPGP8z  0      -ArPGP8x;
0      0      0      0      0      0      0      0      0
0      -ArPGP5y  ArPGP5x  0      0      0      0      0      0
0      -ArPGP8y  ArPGP8x  0;
];
% MATRIZ DE VALORES INDEPENDIENTES
B = [AaRAx*mRA+FP1x;
AaRAY*mRA+FP1y+mRA*g;
AaRAz*mRA+FP1z;
AaRBx*mRB;
AaRBy*mRB+mRB*g;
AaRBz*mRB;
AaREx*mRE;
AaREy*mRE+mRE*g;
AaREz*mRE;
AaRCx*mRC;
AaRCy*mRC+mRC*g;
AaRCz*mRC;
AaRGx*mRG;
AaRGy*mRG+mRG*g;
AaRGz*mRG;
OpAy*(Iaa31*OpAx+Iaa32*OpAy+Iaa33*OpAz) -
OpAz*(Iaa21*OpAx+Iaa22*OpAy+Iaa23*OpAz)+Iaa11*O2pAx+Iaa12*O2pAy+Iaa
13*O2pAz-ArPAP1y*FP1z+ArPAP1z*FP1y;
OpAz*(Iaa11*OpAx+Iaa12*OpAy+Iaa13*OpAz) -
OpAx*(Iaa31*OpAx+Iaa32*OpAy+Iaa33*OpAz)+Iaa21*O2pAx+Iaa22*O2pAy+Iaa
23*O2pAz-ArPAP1z*FP1x+ArPAP1x*FP1z;

```

```

OpAx* (Iaa21*OpAx+Iaa22*OpAy+Iaa23*OpAz) -
OpAy* (Iaa11*OpAx+Iaa12*OpAy+Iaa13*OpAz) +Iaa31*O2pAx+Iaa32*O2pAy+Iaa
33*O2pAz-ArPAP1x*FP1y+ArPAP1y*FP1x;
OpBy* (Ibb31*OpBx+Ibb32*OpBy+Ibb33*OpBz) -
OpBz* (Ibb21*OpBx+Ibb22*OpBy+Ibb23*OpBz) +Ibb11*O2pBx+Ibb12*O2pBy+Ibb
13*O2pBz;
OpBz* (Ibb11*OpBx+Ibb12*OpBy+Ibb13*OpBz) -
OpBx* (Ibb31*OpBx+Ibb32*OpBy+Ibb33*OpBz) +Ibb21*O2pBx+Ibb22*O2pBy+Ibb
23*O2pBz;
OpBx* (Ibb21*OpBx+Ibb22*OpBy+Ibb23*OpBz) -
OpBy* (Ibb11*OpBx+Ibb12*OpBy+Ibb13*OpBz) +Ibb31*O2pBx+Ibb32*O2pBy+Ibb
33*O2pBz;
OpCy* (Icc31*OpCx+Icc32*OpCy+Icc33*OpCz) -
OpCz* (Icc21*OpCx+Icc22*OpCy+Icc23*OpCz) +Icc11*O2pCx+Icc12*O2pCy+Icc
13*O2pCz;
OpCz* (Icc11*OpCx+Icc12*OpCy+Icc13*OpCz) -
OpCx* (Icc31*OpCx+Icc32*OpCy+Icc33*OpCz) +Icc21*O2pCx+Icc22*O2pCy+Icc
23*O2pCz;
OpCx* (Icc21*OpCx+Icc22*OpCy+Icc23*OpCz) -
OpCy* (Icc11*OpCx+Icc12*OpCy+Icc13*OpCz) +Icc31*O2pCx+Icc32*O2pCy+Icc
33*O2pCz;
OpEy* (Iee31*OpEx+Iee32*OpEy+Iee33*OpEz) -
OpEz* (Iee21*OpEx+Iee22*OpEy+Iee23*OpEz) +Iee11*O2pEx+Iee12*O2pEy+Iee
13*O2pEz;
OpEz* (Iee11*OpEx+Iee12*OpEy+Iee13*OpEz) -
OpEx* (Iee31*OpEx+Iee32*OpEy+Iee33*OpEz) +Iee21*O2pEx+Iee22*O2pEy+Iee
23*O2pEz;
OpEx* (Iee21*OpEx+Iee22*OpEy+Iee23*OpEz) -
OpEy* (Iee11*OpEx+Iee12*OpEy+Iee13*OpEz) +Iee31*O2pEx+Iee32*O2pEy+Iee
33*O2pEz;
OpGy* (Igg31*OpGx+Igg32*OpGy+Igg33*OpGz) -
OpGz* (Igg21*OpGx+Igg22*OpGy+Igg23*OpGz) +Igg11*O2pGx+Igg12*O2pGy+Igg
13*O2pGz;
OpGz* (Igg11*OpGx+Igg12*OpGy+Igg13*OpGz) -
OpGx* (Igg31*OpGx+Igg32*OpGy+Igg33*OpGz) +Igg21*O2pGx+Igg22*O2pGy+Igg
23*O2pGz;
OpGx* (Igg21*OpGx+Igg22*OpGy+Igg23*OpGz) -
OpGy* (Igg11*OpGx+Igg12*OpGy+Igg13*OpGz) +Igg31*O2pGx+Igg32*O2pGy+Igg
33*O2pGz;
];
% MATRIZ DE SOLUCIONES DE LAS ECUACIONES
C = pinv(A)*B;
% CONVERSION DE LOS VALORES EN MATRICES
Fp1x = FP1x;
Fp1y = FP1y;
Fp1z = FP1z;
Fp1(i,:) = [Fp1x Fp1y Fp1z];
Fp2x = C(1);

```

```

Fp2y = C(2);
Fp2z = C(3);
Fp2(i,:) = [Fp2x Fp2y Fp2z];
Fp3x = C(4);
Fp3y = C(5);
Fp3z = C(6);
Fp3(i,:) = [Fp3x Fp3y Fp3z];
Fp4x = C(7);
Fp4y = C(8);
Fp4z = C(9);
Fp4(i,:) = [Fp4x Fp4y Fp4z];
Fp5x = C(10);
Fp5y = C(11);
Fp5z = C(12);
Fp5(i,:) = [Fp5x Fp5y Fp5z];
Fp6x = C(13);
Fp6y = C(14);
Fp6z = C(15);
Fp6(i,:) = [Fp6x Fp6y Fp6z];
Fp7x = C(16);
Fp7y = C(17);
Fp7z = C(18);
Fp7(i,:) = [Fp7x Fp7y Fp7z];
Fp8x = C(19);
Fp8y = C(20);
Fp8z = C(21);
Fp8(i,:) = [Fp8x Fp8y Fp8z];
t_sim(i) = i;
% MAGNITUDES DE LAS FUERZAS
mag_Fp1(i) = norm(Fp1(i,:));
mag_Fp2(i) = norm(Fp2(i,:));
mag_Fp3(i) = norm(Fp3(i,:));
mag_Fp4(i) = norm(Fp4(i,:));
mag_Fp5(i) = norm(Fp5(i,:));
mag_Fp6(i) = norm(Fp6(i,:));
mag_Fp7(i) = norm(Fp7(i,:));
mag_Fp8(i) = norm(Fp8(i,:));
% CALCULO DE TORQUES
TETHA = ang_brazo_antivoltcadura*(pi()/180); %Angulo para
la obtención del brazo de palanca antivoltcadura
Tm1(i) = (r*(sin(TETHA)*Fp6(i,2) + cos(TETHA)*Fp6(i,1)));
%Calculo del torque del motor 1
Tm2(i) = (r*(sin(TETHA)*Fp7(i,2) + cos(TETHA)*Fp7(i,1)));
%Calculo del torque del motor 2
Tm3(i) = (r*(sin(TETHA)*Fp8(i,2) + cos(TETHA)*Fp8(i,1)));
%Calculo del torque del motor 3
% ELIMINACIÓN DE VALORES NEGATIVOS DE LOS TORQUES
if Tm1(i)<0

```

```

        Tm1(i) = 0;
end
if Tm2(i)<0
    Tm2(i) = 0;
end
if Tm3(i)<0
    Tm3(i) = 0;
end
% ELIMINACIÓN DE PICOS
if i> 10
if Tm1(i)>Tm1(i-1)+5
    Tm1(i) = Tm1(i-1);
end
if Tm2(i)>Tm2(i-1)+5
    Tm2(i) = Tm2(i-1);
end
if Tm3(i)>Tm2(i-1)+5
    Tm3(i) = Tm3(i-1);
end
end
% % PROMEDIO CON 20 DATOS
% TM1(i) =
(Tm1(i)+Tm1_1+Tm1_2+Tm1_3+Tm1_4+Tm1_5+Tm1_6+Tm1_7+Tm1_8+Tm1_9+Tm1_10+Tm1_11+Tm1_12+Tm1_13+Tm1_14+Tm1_15+Tm1_16+Tm1_17+Tm1_18+Tm1_19)/20;
% TM2(i) =
(Tm2(i)+Tm2_1+Tm2_2+Tm2_3+Tm2_4+Tm2_5+Tm2_6+Tm2_7+Tm2_8+Tm2_9+Tm2_10+Tm2_11+Tm2_12+Tm2_13+Tm2_14+Tm2_15+Tm2_16+Tm2_17+Tm2_18+Tm2_19)/20;
% TM3(i) =
(Tm3(i)+Tm3_1+Tm3_2+Tm3_3+Tm3_4+Tm3_5+Tm3_6+Tm3_7+Tm3_8+Tm3_9+Tm3_10+Tm3_11+Tm3_12+Tm3_13+Tm3_14+Tm3_15+Tm3_16+Tm3_17+Tm3_18+Tm3_19)/20;
% % PROMEDIO CON 10 DATOS
% TM1(i) =
(Tm1(i)+Tm1_1+Tm1_2+Tm1_3+Tm1_4+Tm1_5+Tm1_6+Tm1_7+Tm1_8+Tm1_9)/10;
% TM2(i) =
(Tm2(i)+Tm2_1+Tm2_2+Tm2_3+Tm2_4+Tm2_5+Tm2_6+Tm2_7+Tm2_8+Tm2_9)/10;
% TM3(i) =
(Tm3(i)+Tm3_1+Tm3_2+Tm3_3+Tm3_4+Tm3_5+Tm3_6+Tm3_7+Tm3_8+Tm3_9)/10;
% % PROMEDIO CON 5 DATOS
TM1F(i) = (Tm1(i)+Tm1_1+Tm1_2+Tm1_3+Tm1_4)/5;
TM2F(i) = (Tm2(i)+Tm2_1+Tm2_2+Tm2_3+Tm2_4)/5;
TM3F(i) = (Tm3(i)+Tm3_1+Tm3_2+Tm3_3+Tm3_4)/5;
% ACTUALIZACIÓN DE REGISTROS DEL TORQUE 1
Tm1_19 = Tm1_18;
Tm1_18 = Tm1_17;
Tm1_17 = Tm1_16;

```

```

Tm1_16 = Tm1_15;
Tm1_15 = Tm1_14;
Tm1_14 = Tm1_13;
Tm1_13 = Tm1_12;
Tm1_12 = Tm1_11;
Tm1_11 = Tm1_10;
Tm1_10 = Tm1_9;
Tm1_9 = Tm1_8;
Tm1_8 = Tm1_7;
Tm1_7 = Tm1_6;
Tm1_6 = Tm1_5;
Tm1_5 = Tm1_4;
Tm1_4 = Tm1_3;
Tm1_3 = Tm1_2;
Tm1_2 = Tm1_1;
Tm1_1 = Tm1(i);
% ACTUALIZACIÓN DE REGISTROS DEL TORQUE 2
Tm2_19 = Tm2_18;
Tm2_18 = Tm2_17;
Tm2_17 = Tm2_16;
Tm2_16 = Tm2_15;
Tm2_15 = Tm2_14;
Tm2_14 = Tm2_13;
Tm2_13 = Tm2_12;
Tm2_12 = Tm2_11;
Tm2_11 = Tm2_10;
Tm2_10 = Tm2_9;
Tm2_9 = Tm2_8;
Tm2_8 = Tm2_7;
Tm2_7 = Tm2_6;
Tm2_6 = Tm2_5;
Tm2_5 = Tm2_4;
Tm2_4 = Tm2_3;
Tm2_3 = Tm2_2;
Tm2_2 = Tm2_1;
Tm2_1 = Tm2(i);
% ACTUALIZACIÓN DE REGISTROS DEL TORQUE 3
Tm3_19 = Tm3_18;
Tm3_18 = Tm3_17;
Tm3_17 = Tm3_16;
Tm3_16 = Tm3_15;
Tm3_15 = Tm3_14;
Tm3_14 = Tm3_13;
Tm3_13 = Tm3_12;
Tm3_12 = Tm3_11;
Tm3_11 = Tm3_10;
Tm3_10 = Tm3_9;
Tm3_9 = Tm3_8;

```

```

Tm3_8 = Tm3_7;
Tm3_7 = Tm3_6;
Tm3_6 = Tm3_5;
Tm3_5 = Tm3_4;
Tm3_4 = Tm3_3;
Tm3_3 = Tm3_2;
Tm3_2 = Tm3_1;
Tm3_1 = Tm3(i);
% PESO DE LOS COMPONENTES
wRA = [0 mRA*g 0]; %Peso del rocker
wRB = [0 mRB*g 0]; %Peso del bogie
wRC = [0 mRC*g 0]; %Peso de la C
wRE = [0 mRE*g 0]; %Peso de la C
wRG = [0 mRG*g 0]; %Peso de la C
% ERROR EN LAS ECUACIONES DE MOMENTOS
ERROR_EQ6(i,:) = cross(-
Fp1(i,:),ArPAP1(i,:))+cross(Fp2(i,:),ArPAP2(i,:))+cross(Fp5(i,:),Ar
PAP5(i,:))-(Iaa*O2pA(i,:))'-cross(OpA(i,:),Iaa*OpA(i,:))');
ERROR_EQ7(i,:) =
cross(Fp3(i,:),ArPBP3(i,:))+cross(Fp4(i,:),ArPBP4(i,:))-
(Ibb*O2pB(i,:))'-cross(OpB(i,:),Ibb*OpB(i,:))');
ERROR_EQ8(i,:) = cross(-
Fp4(i,:),ArPCP4(i,:))+cross(Fp6(i,:),ArPCP6(i,:))-
(Icc*O2pC(i,:))'-cross(OpC(i,:),Icc*OpC(i,:))');
ERROR_EQ9(i,:) = cross(-
Fp3(i,:),ArPEP3(i,:))+cross(Fp7(i,:),ArPEP7(i,:))-
(Iee*O2pE(i,:))'-cross(OpE(i,:),Iee*OpE(i,:))');
ERROR_EQ10(i,:) = cross(-
Fp5(i,:),ArPGP5(i,:))+cross(Fp8(i,:),ArPGP8(i,:))-
(Igg*O2pG(i,:))'-cross(OpG(i,:),Igg*OpG(i,:))');
end
%VALOR Y POSICIÓN DE LAS FUERZAS MAXIMAS
[Fp1_Max,Pos_Max_Fp1] = max(mag_Fp1);
[Fp2_Max,Pos_Max_Fp2] = max(mag_Fp2);
[Fp3_Max,Pos_Max_Fp3] = max(mag_Fp3);
[Fp4_Max,Pos_Max_Fp4] = max(mag_Fp4);
[Fp5_Max,Pos_Max_Fp5] = max(mag_Fp5);
[Fp6_Max,Pos_Max_Fp6] = max(mag_Fp6);
[Fp7_Max,Pos_Max_Fp7] = max(mag_Fp7);
[Fp8_Max,Pos_Max_Fp8] = max(mag_Fp8);
[Tm1_Max,Pos_Max_Tm1] = max(Tm1);
[Tm2_Max,Pos_Max_Tm2] = max(Tm2);
[Tm3_Max,Pos_Max_Tm3] = max(Tm3);
% ERRORES EN LAS ECUACIONES DE FUERZAS
ERROR_EQ1 = -Fp1 + Fp2 + Fp5 - wRA - mRA*AaRA;
ERROR_EQ2 = -Fp2 + Fp3 + Fp4 - wRB - mRB*AaRB;
ERROR_EQ3 = -Fp3 + Fp7 - wRE - mRE*AaRE;
ERROR_EQ4 = -Fp4 + Fp6 - wRC - mRC*AaRC;

```



```

ERROR_EQ5 = -Fp5 + Fp8 - wRG - mRG*AaRG;
%% ERRORES MAXIMOS AL CALCULAR LAS FUERZAS
MAX_ERROR_EQ1 = max(ERROR_EQ1)
MAX_ERROR_EQ2 = max(ERROR_EQ2)
MAX_ERROR_EQ3 = max(ERROR_EQ3)
MAX_ERROR_EQ4 = max(ERROR_EQ4)
MAX_ERROR_EQ5 = max(ERROR_EQ5)
MAX_ERROR_EQ6 = max(ERROR_EQ6)
MAX_ERROR_EQ7 = max(ERROR_EQ7)
MAX_ERROR_EQ8 = max(ERROR_EQ8)
MAX_ERROR_EQ9 = max(ERROR_EQ9)
MAX_ERROR_EQ10 = max(ERROR_EQ10)
%% VALORES MAXIMOS DE FUERZA PARA HACER EL ANALISIS DE ELEMENTOS
FINITOS
Fp1_FEA = Fp1(Pos_Max_Fp1,:)
Fp2_FEA = Fp2(Pos_Max_Fp2,:)
Fp3_FEA = Fp3(Pos_Max_Fp3,:)
Fp4_FEA = Fp4(Pos_Max_Fp4,:)
Fp5_FEA = Fp5(Pos_Max_Fp5,:)
Fp6_FEA = Fp6(Pos_Max_Fp6,:)
Fp7_FEA = Fp7(Pos_Max_Fp7,:)
Fp8_FEA = Fp8(Pos_Max_Fp8,:)
%% RESULTADOS
% GRAFICAS COMPARATIVAS ENTRE EL TORQUE CALCULADO Y EL OBTENIDO EN
SOLIDWORKS
figure(2)
subplot(3,1,1)
plot(t_sim,Tm1,t_sim,TM3)
title(subplot(3,1,1),'Torque Motor Llanta 1 Calculado vs Simulado -
P6')
legend(subplot(3,1,1),{'Torque Calculado','Torque Simulado'})
ylabel('Torque (N*m)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
subplot(3,1,2)
plot(t_sim,Tm2,t_sim,TM2)
title(subplot(3,1,2),'Torque Motor Llanta 2 Calculado vs Simulado -
P7')
legend(subplot(3,1,2),{'Torque Calculado','Torque Simulado'})
ylabel('Torque (N*m)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
subplot(3,1,3)
plot(t_sim,Tm3,t_sim,TM1)
title(subplot(3,1,3),'Torque Motor Llanta 3 Calculado vs Simulado -
P8')
legend(subplot(3,1,3),{'Torque Calculado','Torque Simulado'})
ylabel('Torque (N*m)')

```

```

xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
% GRAFICAS COMPARATIVAS ENTRE EL TORQUE CALCULADO LUEGO DEL FILTRO
VS EL TORQUE DE SOLIDWORKS
figure(3)
subplot(3,1,1)
plot(t_sim,TM1F,t_sim,Tm1)
title(subplot(3,1,1),'Torque Motor Llanta 1 Filtrado vs Simulado -
P6')
legend(subplot(3,1,1),{'Torque Calculado Filtrado','Torque
Calculado'})
ylabel('Torque (N*m)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
subplot(3,1,2)
plot(t_sim,TM2F,t_sim,Tm2)
title(subplot(3,1,2),'Torque Motor Llanta 2 Filtrado vs Simulado -
P7')
legend(subplot(3,1,2),{'Torque Calculado Filtrado','Torque
Calculado'})
ylabel('Torque (N*m)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
subplot(3,1,3)
plot(t_sim,TM3F,t_sim,Tm3)
title(subplot(3,1,3),'Torque Motor Llanta 3 Filtrado vs Simulado -
P8')
legend(subplot(3,1,3),{'Torque Calculado Filtrado','Torque
Calculado'})
ylabel('Torque (N*m)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
% GRAFICA COMPARATIVA ENTRE LOS TORQUES DE CADA LLANTA
figure(4)
plot(t_sim,TM1F,t_sim,TM2F,t_sim,TM3F)
title('TORQUES CALCULADOS FILTRADOS')
legend('Torque Llanta 1','Torque Llanta 2','Torque Llanta 3')
ylabel('Torque (N*m)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
figure(5)
plot(t_sim,TM3,t_sim,TM2,t_sim,TM1)
title('TORQUES SIMULADOS')
legend('Torque Llanta 1','Torque Llanta 2','Torque Llanta 3')
ylabel('Torque (N*m)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
figure(6)

```

```

plot(t_sim,Tm1,t_sim,Tm2,t_sim,Tm3)
title('TORQUES CALCULADOS')
legend('Torque Llanta 1','Torque Llanta 2','Torque Llanta 3')
ylabel('Torque (N*m)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
% VALORES DE TORQUE MAXIMO EN Kg*cm SOLICITADO POR CADA LLANTA
Tm1_max = max(Tm1*10.197162129779)
Tm2_max = max(Tm2*10.197162129779)
Tm3_max = max(Tm3*10.197162129779)
% GRAFICAS DE FUERZAS
% P1
figure(7)
subplot(3,1,1)
plot(Fp1(:,1))
title(subplot(3,1,1),'Fuerzas en el punto P1 en "X"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
subplot(3,1,2)
plot(-Fp1(:,2))
title(subplot(3,1,2),'Fuerzas en el punto P1 en "Y"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
subplot(3,1,3)
plot(Fp1(:,3))
title(subplot(3,1,3),'Fuerzas en el punto P1 en "Z"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
% P2
figure(8)
subplot(3,1,1)
plot(Fp2(:,1))
title(subplot(3,1,1),'Fuerzas en el punto P2 en "X"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
subplot(3,1,2)
plot(Fp2(:,2))
title(subplot(3,1,2),'Fuerzas en el punto P2 en "Y"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
subplot(3,1,3)
plot(Fp2(:,3))
title(subplot(3,1,3),'Fuerzas en el punto P2 en "Z"')

```

```

ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
% P3
figure(9)
subplot(3,1,1)
plot(Fp3(:,1))
title(subplot(3,1,1), 'Fuerzas en el punto P3 en "X"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
subplot(3,1,2)
plot(Fp3(:,2))
title(subplot(3,1,2), 'Fuerzas en el punto P3 en "Y"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
subplot(3,1,3)
plot(Fp3(:,3))
title(subplot(3,1,3), 'Fuerzas en el punto P3 en "Z"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
% P4
figure(10)
subplot(3,1,1)
plot(Fp4(:,1))
title(subplot(3,1,1), 'Fuerzas en el punto P4 en "X"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
subplot(3,1,2)
plot(Fp4(:,2))
title(subplot(3,1,2), 'Fuerzas en el punto P4 en "Y"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
subplot(3,1,3)
plot(Fp4(:,3))
title(subplot(3,1,3), 'Fuerzas en el punto P4 en "Z"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
% P5
figure(11)
subplot(3,1,1)
plot(Fp5(:,1))
title(subplot(3,1,1), 'Fuerzas en el punto P5 en "X"')

```

```

ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
subplot(3,1,2)
plot(Fp5(:,2))
title(subplot(3,1,2), 'Fuerzas en el punto P5 en "Y"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
subplot(3,1,3)
plot(Fp5(:,3))
title(subplot(3,1,3), 'Fuerzas en el punto P5 en "Z"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
% P6
figure(12)
subplot(3,1,1)
plot(Fp6(:,1))
title(subplot(3,1,1), 'Fuerzas en el punto P6 en "X"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
subplot(3,1,2)
plot(Fp6(:,2))
title(subplot(3,1,2), 'Fuerzas en el punto P6 en "Y"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
subplot(3,1,3)
plot(Fp6(:,3))
title(subplot(3,1,3), 'Fuerzas en el punto P6 en "Z"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
% P7
figure(13)
subplot(3,1,1)
plot(Fp7(:,1))
title(subplot(3,1,1), 'Fuerzas en el punto P7 en "X"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
subplot(3,1,2)
plot(Fp7(:,2))
title(subplot(3,1,2), 'Fuerzas en el punto P7 en "Y"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')

```

```

xlim([0 long_t])
subplot(3,1,3)
plot(Fp7(:,3))
title(subplot(3,1,3), 'Fuerzas en el punto P7 en "Z"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
% P8
figure(14)
subplot(3,1,1)
plot(Fp8(:,1))
title(subplot(3,1,1), 'Fuerzas en el punto P8 en "X"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
subplot(3,1,2)
plot(Fp8(:,2))
title(subplot(3,1,2), 'Fuerzas en el punto P8 en "Y"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])
subplot(3,1,3)
plot(Fp8(:,3))
title(subplot(3,1,3), 'Fuerzas en el punto P8 en "Z"')
ylabel('Fuerza (N)')
xlabel('Muestras')
xlim([0 long_t])

```

8.3. PROGRAMACIÓN APLICACIÓN

A continuación, se evidenciarán las imágenes que completan la programación de la aplicación mostrada anteriormente, dicha aplicación se realizó para el correcto funcionamiento del vehículo, todo en el portal web del MIT (app inventor).

8.3.1. VENTANA DE CONTROL POR VOZ

En este apartado se mostrará la programación faltante para el correcto funcionamiento de la ventana de control por voz, recordemos que la parte inicial de esta información se encuentra en el desarrollo del documento.

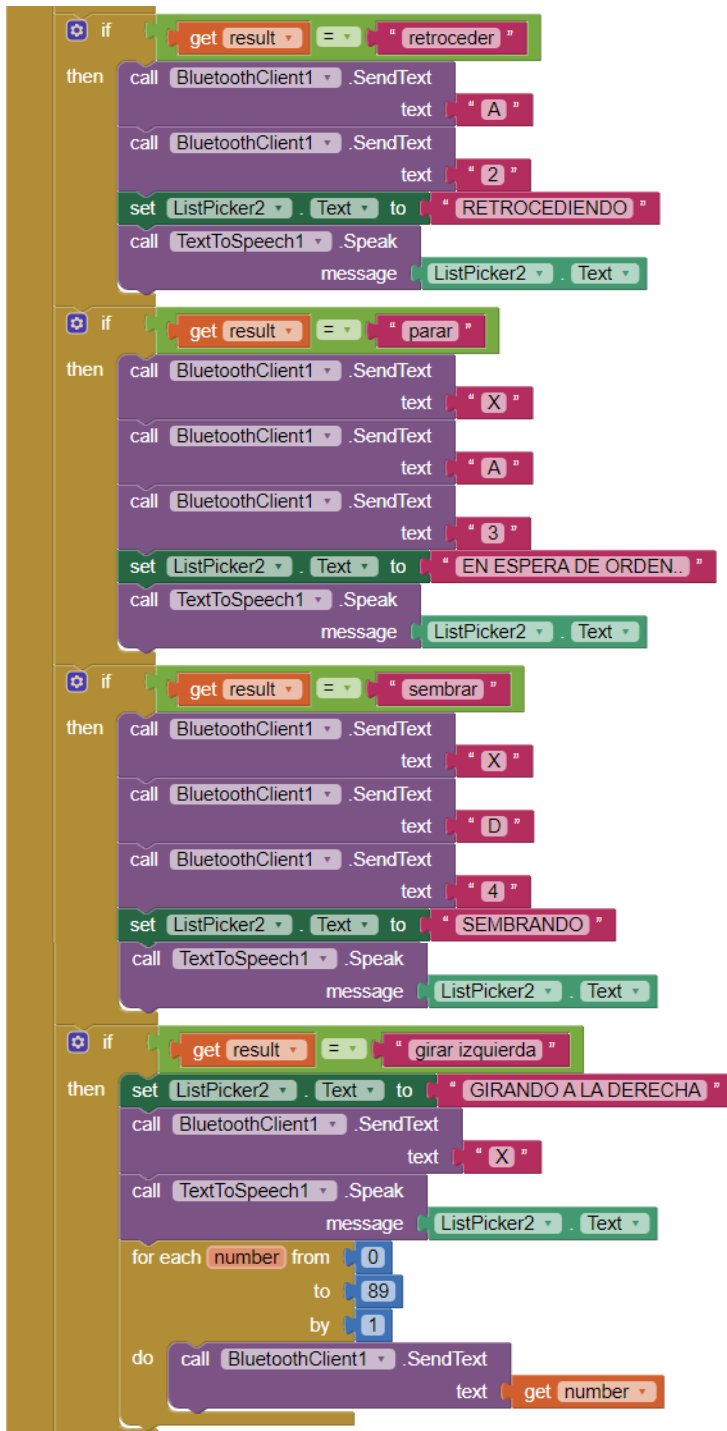


Ilustración 158 Parte 2 de la programación de la ventana de control por voz.

```

if (get result == "girar derecha")
then
  call BluetoothClient1 .SendText
  text "X"
  set ListPicker2 .Text to "GIRANDO A LA DERECHA"
  call TextToSpeech1 .Speak
  message ListPicker2 .Text
  for each number from 90
  to 180
  by 1
  do call BluetoothClient1 .SendText
  text get number

if (get result == "abrir valvula")
then
  set ListPicker2 .Text to "ABRIENDO VALVULA"
  call BluetoothClient1 .SendText
  text "X"
  call BluetoothClient1 .SendText
  text "C"
  call TextToSpeech1 .Speak
  message ListPicker2 .Text
  for each number from 181
  to 205
  by 2
  do call BluetoothClient1 .SendText
  text get number

```

Ilustración 159 Parte 3 de la programación de la ventana de control por voz.

8.3.2. VENTANA DE CONTROL POR BOTONES

De manera similar que el inciso anterior, en este apartado se mostrará la continuación del código realizado para el funcionamiento de la aplicación, pero esta vez es la programación correspondiente a la ventana de control por botones, como se muestra a continuación.

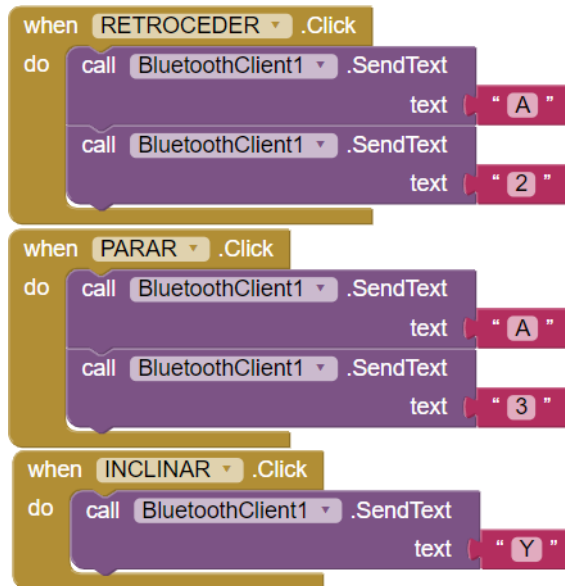


Ilustración 160 Parte 2 de la ventana de control por botones de la aplicación.

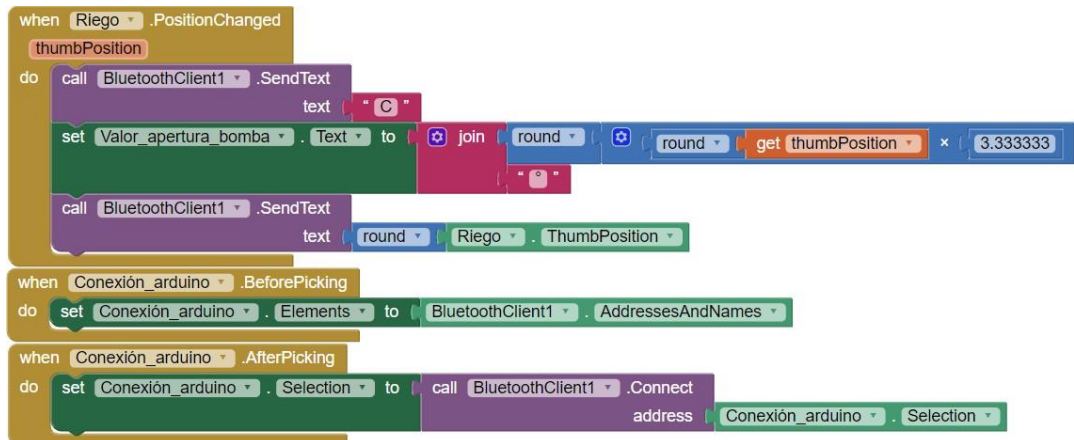


Ilustración 161 Parte 3 de la ventana de control por botones de la aplicación.

8.4. PROGRAMACIÓN EN ARDUINO

En este apartado se agregó el código completo desarrollado en la IDE de Arduino ® con el fin de controlar el vehículo, dicho código fue subido al microcontrolador y se corroboró el correcto funcionamiento.

```

/* CODIGO DE PROYECTO DE GRADO
* Programa para controlar un vehiculo tipo rover (rocker-bogie), del proyecto
* de grado que tiene de titulo.
* DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE
VEHÍCULO TIPO ROVER
* NO TRIPULADO PARA LA SIEMBRA, FERTILIZACIÓN Y TRANSPORTE
DE PRODUCTOS
* AGRÍCOLAS EN TERRENOS IRREGULARES DEL CORREGIMIENTO
DE BERLÍN SANTANDER
* Realizado por: José D. Bohoquez Guerra
*             Guillermo A. Carrasquilla
*             Heider A. Carvajal Pulido
*/
// INCLUSIÓN DE LIBRERIAS NECESARIAS
#include <Servo.h>
#include <Wire.h>
#include "I2Cdev.h"
#include <MPU6050.h>
// CREACIÓN DE LOS SERVOMOTORES
Servo S1;
Servo S2;
Servo S3;
Servo S4;
Servo S5;
Servo S6;
Servo S7;
Servo S8;
Servo S9;
Servo S10;
Servo S11;
// CREACIÓN DEL SENSOR MPU6050
MPU6050 sensor;
// CONFIGURACIÓN DE PINES
// PINES DE DIRECCIÓN DE MOTORREDUCTORES
const int PD1M1 = 24;
const int PD2M1 = 25;
const int PD1M2 = 26;
const int PD2M2 = 27;
const int PD1M3 = 28;

```

```

const int PD2M3 = 29;
const int PD1M4 = 30;
const int PD2M4 = 31;
const int PD1M5 = 32;
const int PD2M5 = 33;
const int PD1M6 = 34;
const int PD2M6 = 35;
const int PD1M7 = 36;
const int PD2M7 = 37;
// PINES DE MOVIMIENTO DE LOS SERVOMOTORES
const int PSM1 = 2;
const int PSM2 = 3;
const int PSM3 = 4;
const int PSM4 = 5;
const int PSM5 = 6;
const int PSM6 = 7;
const int PSM7 = 8;
const int PSM8 = 9;
const int PSM9 = 10;
const int PSM10 = 11;
const int PSM11 = 12;
// ENABLE DRIVER VNH2SP30
#define EN_PIN_1 A1
// VARIABLES A UTILIZAR EN EL PROGRAMA
String estado;
int dato = 0;
int sentido = 0;
char valor;
int siembra = 0;
int riego = 0;
int16_t ax;
int16_t ay;
int16_t az;
float ang = 0.0;
float ang_1 = 0.0;
float ang_2 = 0.0;
float ang_3 = 0.0;
float ang_4 = 0.0;
float ang_5 = 0.0;

```

```

float ang_6 = 0.0;
float ang_7 = 0.0;
float ang_8 = 0.0;
float ang_9 = 0.0;
float ang_10 = 0.0;
float ang_11 = 0.0;
float ang_12 = 0.0;
float ang_13 = 0.0;
float ang_14 = 0.0;
float ang_15 = 0.0;
float ang_16 = 0.0;
float ang_17 = 0.0;
float ang_18 = 0.0;
float ang_19 = 0.0;
float ang_20 = 0.0;
float angulo_prom = 0.0;
int servo1 = 0;
int servo2 = 0;
int servo3 = 0;
int servo4 = 0;
int t = 15;
int PVM7 = 13;
// LECTURA DE LOS DATOS RECIBIDOS POR BLUETOOTH
void LecturaBluetooth(){
  delay(10);
  while (Serial1.available()){
    char c = Serial1.read();
    estado += c;
    dato = estado.toInt();
  }
}
// CONFIGURACIÓN DE SENTIDO DE GIRO DE LOS
MOTORREDUCTORES
void DireccionMotores(int IN1, int IN2){
  digitalWrite(PD1M1, IN1);
  digitalWrite(PD2M1, IN2);
  digitalWrite(PD1M2, IN1);
  digitalWrite(PD2M2, IN2);
  digitalWrite(PD1M3, IN1);

```

```

digitalWrite(PD2M3, IN2);
digitalWrite(PD1M4, IN1);
digitalWrite(PD2M4, IN2);
digitalWrite(PD1M5, IN1);
digitalWrite(PD2M5, IN2);
digitalWrite(PD1M6, IN1);
digitalWrite(PD2M6, IN2);
}
// CONFIGURACIÓN DE ACCIÓN A REALIZAR
void MotoresTransporte(){
  LecturaBluetooth();
  if (dato == 1){ //ACCIÓN DE AVANZAR
    if (sentido == 2){
      DireccionMotores(LOW, LOW);
      delay(1000);
    }
    DireccionMotores(LOW, HIGH);
    sentido = 1;
  }
  if (dato == 2){ //ACCIÓN DE RETROCEDER
    if (sentido == 1){
      DireccionMotores(LOW, LOW);
      delay(1000);
    }
    DireccionMotores(HIGH, LOW);
    sentido = 2;
  }
  if (dato == 3){ //ACCIÓN DE DETENER
    DireccionMotores(LOW, LOW);
    sentido = 3;
  }
  estado = "";
}
// MOVIMIENTO DE LOS SERVOMOTORES DE DIRECCIÓN
void ServosDireccion(){
  LecturaBluetooth();
  dato = map(dato, 0, 36, 0, 180);
  Serial.println(dato);
  S1.write(dato);
}

```

```

S2.write(dato);
S3.write(dato);
S4.write(dato);
S5.write(dato);
S6.write(dato);
estado = "";
}
// MOVIMIENTO DEL SERVOMOTOR DE LA VALVULA DE RIEGO
void Riego(){
  LecturaBluetooth();
  dato = map(dato, 0, 30, 60, 10); //ANGULO DE LA APERTURA DE LA
VALVULA
  S7.write(dato);
  estado = "";
}
// ACCIÓN DE SEMBRAR
void Siembra(){
  LecturaBluetooth();
  if (siembra == 0){ //MOVER SERVOMOTORES A POSICIÓN INICIAL
    S8.write(0);
    S9.write(0);
    S10.write(0);
    S11.write(0);
  }
  if (dato == 4){ //SELECCIÓN DE SEMILLA
    if (siembra == 12){
      siembra = 0;
      S8.write(0);
      S9.write(0);
      S10.write(0);
      S11.write(0);
    }
    else{
      siembra = siembra + 1;
    }
  }
  //ACCIÓN DE SEMBRAR
  switch (siembra){
  case 1:
    while(servo1 < 52){

```

```

    servo1 = servo1+1;
    delay(t);
    S8.write(servo1);
}
break;
case 2:
while(servo1 < 110){
    servo1 = servo1+1;
    delay(t);
    S8.write(servo1);
}
break;
case 3:
while(servo1 < 165){
    servo1 = servo1+1;
    delay(t);
    S8.write(servo1);
}
servo1 = 0;
break;
case 4:
S8.write(80);
while(servo2 < 60){
    servo2 = servo2+1;
    delay(t);
    S9.write(servo2);
}
break;
case 5:
while(servo2 < 120){
    servo2 = servo2+1;
    delay(t);
    S9.write(servo2);
}
break;
case 6:
while(servo2 < 180){
    servo2 = servo2+1;
    delay(t);

```

```

    S9.write(servo2);
  }
  servo2 = 0;
  break;
case 7:
  S9.write(150);
  while(servo3 < 50){
    servo3 = servo3+1;
    delay(t);
    S10.write(servo3);
  }
  break;
case 8:
  while(servo3 < 110){
    servo3 = servo3+1;
    delay(t);
    S10.write(servo3);
  }
  break;
case 9:
  while(servo3 < 160){
    servo3 = servo3+1;
    delay(t);
    S10.write(servo3);
  }
  break;
case 10:
  while(servo4 < 55){
    servo4 = servo4+1;
    delay(t);
    S11.write(servo4);
  }
  break;
case 11:
  while(servo4 < 110){
    servo4 = servo4+1;
    delay(t);
    S11.write(servo4);
  }
}

```



```

        break;
    case 12:
        while(servo4 < 165){
            servo4 = servo4+1;
            delay(t);
            S11.write(servo4);
        }
        break;
    }
    estado = "";
}
}
// CONFIGURACIÓN MOTOR PLACA
void motorGo(uint8_t motor, uint8_t direct, uint8_t pwm){
    if(motor == 0){
        if(direct == 2){
            digitalWrite(PD1M7,LOW);
            digitalWrite(PD2M7,HIGH);
        }
        else if(direct == 1){
            digitalWrite(PD1M7,HIGH);
            digitalWrite(PD2M7,LOW);
        }
        else{
            digitalWrite(PD1M7,LOW);
            digitalWrite(PD2M7,LOW);
        }
    }
    analogWrite(PVM7, pwm);
}
// OBTENCIÓN DEL ÁNGULO DE LA PLACA
void getAngulo(){
    sensor.getAcceleration(&ax, &ay, &az); //Obtener Aceleraciones
    //Calculando el angulo de inclinación
    ang = 12+atan(ax/sqrt(pow(ay, 2)+pow(az, 2)))*(180.0/3.14);
    angulo_prom =
    (ang+ang_1+ang_2+ang_3+ang_4+ang_5+ang_6+ang_7+ang_8+ang_9+ang_10+ang_11+ang_12+ang_13+ang_14+ang_15+ang_16+ang_17+ang_18+ang_19+ang_20)/20;
}

```

```

// ACTUALIZACIÓN DE REGISTRO DEL SENSOR
ang_20 = ang_19;
ang_19 = ang_18;
ang_18 = ang_17;
ang_17 = ang_16;
ang_16 = ang_15;
ang_15 = ang_14;
ang_14 = ang_13;
ang_13 = ang_12;
ang_12 = ang_11;
ang_11 = ang_10;
ang_10 = ang_9;
ang_9 = ang_8;
ang_8 = ang_7;
ang_7 = ang_6;
ang_6 = ang_5;
ang_5 = ang_4;
ang_4 = ang_3;
ang_3 = ang_2;
ang_2 = ang_1;
ang_1 = ang;
Serial.print(angulo_prom);
Serial.print("\t");
}
// CONFIGURACIÓN DE PINES E INICIALIZACIÓN DE LIBRERIAS
void setup(){
  // INICIANDO LAS COMUNICACIONES.
  Serial.begin(9600); //Computador - Arduino
  Serial1.begin(115200); //Arduino - Modulo Bluetooht
  sensor.initialize(); //Iniciando el Sensor MPU6050
  Wire.begin(); //Arduino - MPU6050
  Serial.println(sensor.testConnection() ? "MPU6050 connection successful" :
"MPU6050 connection failed");
// CONFIGURACIÓN DE LOS PINES DE DIRECCIÓN DE
MOTORREDUCTOR
pinMode(PD1M1, OUTPUT);
pinMode(PD2M1, OUTPUT);
pinMode(PD1M2, OUTPUT);
pinMode(PD2M2, OUTPUT);

```

```

pinMode(PD1M3, OUTPUT);
pinMode(PD2M3, OUTPUT);
pinMode(PD1M4, OUTPUT);
pinMode(PD2M4, OUTPUT);
pinMode(PD1M5, OUTPUT);
pinMode(PD2M5, OUTPUT);
pinMode(PD1M6, OUTPUT);
pinMode(PD2M6, OUTPUT);
pinMode(PD1M7, OUTPUT);
pinMode(PD2M7, OUTPUT);
// VELOCIDAD MOTOR DE LA PLACA
pinMode(PVM7, OUTPUT);
pinMode(EN_PIN_1, OUTPUT);
digitalWrite(EN_PIN_1, HIGH);
// CONFIGURACIÓN DE LOS PINES DE LOS SERVOMOTORES
S1.attach(PSM1);
S2.attach(PSM2);
S3.attach(PSM3);
S4.attach(PSM4);
S5.attach(PSM5);
S6.attach(PSM6);
S7.attach(PSM7);
S8.attach(PSM8);
S9.attach(PSM9);
S10.attach(PSM10);
S11.attach(PSM11);
// POSICIONAR LLANTAS RECTAS AL INICIAR
S1.write(90);
S2.write(90);
S3.write(90);
S4.write(90);
S5.write(90);
S6.write(90);
// POSICIÓN INICIAL SIEMBRA
S8.write(0);
S9.write(0);
S10.write(0);
S11.write(0);
// POSICION INICIAL RIEGO

```

```

S7.write(60);
getAngulo();
motorGo(0,0,0);
}
void loop(){
  getAngulo();
  //MOVER LA PLACA PARA QUE QUEDE ENTRE -3° Y 3°
  if (angulo_prom >= -3 && angulo_prom <= 3){ //ANGULO EN ESTE RANGO
  ES CASI HORIZONTAL
    motorGo(0,0,0);
    Serial.println("stop");
  }
  else if (angulo_prom < -3){ //ANGULO MENOR QUE -3° SE GIRA EN
  CONTRA DE LAS MANECILLAS DEL RELOJ
    motorGo(0,1,70);
    Serial.println("down");
  }
  else{ //ANGULO MAYOR QUE 3° SE GIRA CON LAS MANECILLAS DEL
  RELOJ
    motorGo(0,2,255);
    Serial.println("up");
  }
  if (Serial1.available()){
    valor = Serial1.read();
  // CLASIFICACIÓN DE RUTINAS
    if (valor == 'A'){
      MotoresTransporte();
  //   Serial.println(valor);
    }
    if (valor == 'B'){
      ServosDireccion();
  //   Serial.println(valor);
    }
    if (valor == 'C'){
      Riego();
  //   Serial.println(valor);
    }
    if (valor == 'D'){
      Siembra();

```

```

// Serial.println(valor);
}
if (valor == 'Y'){
do{
motorGo(0,2,255);
getAngulo();
// Serial.println("INCLINAR");
}while (angulo_prom > -22);
do{
motorGo(0,0,0);
// Serial.println("INCLINAR DETENIDO");
if (Serial1.available()){
valor = Serial1.read();
}
}while(valor == 'Y');
}
}
}
}
}

```

8.5. PLANOS DEL VEHÍCULO

En esta sección se adjunta imágenes de los planos realizados para la construcción de cada una de las piezas necesarias para el vehículo tipo rover, así como también se muestran planos de ensamble de algunas de las piezas para su construcción.

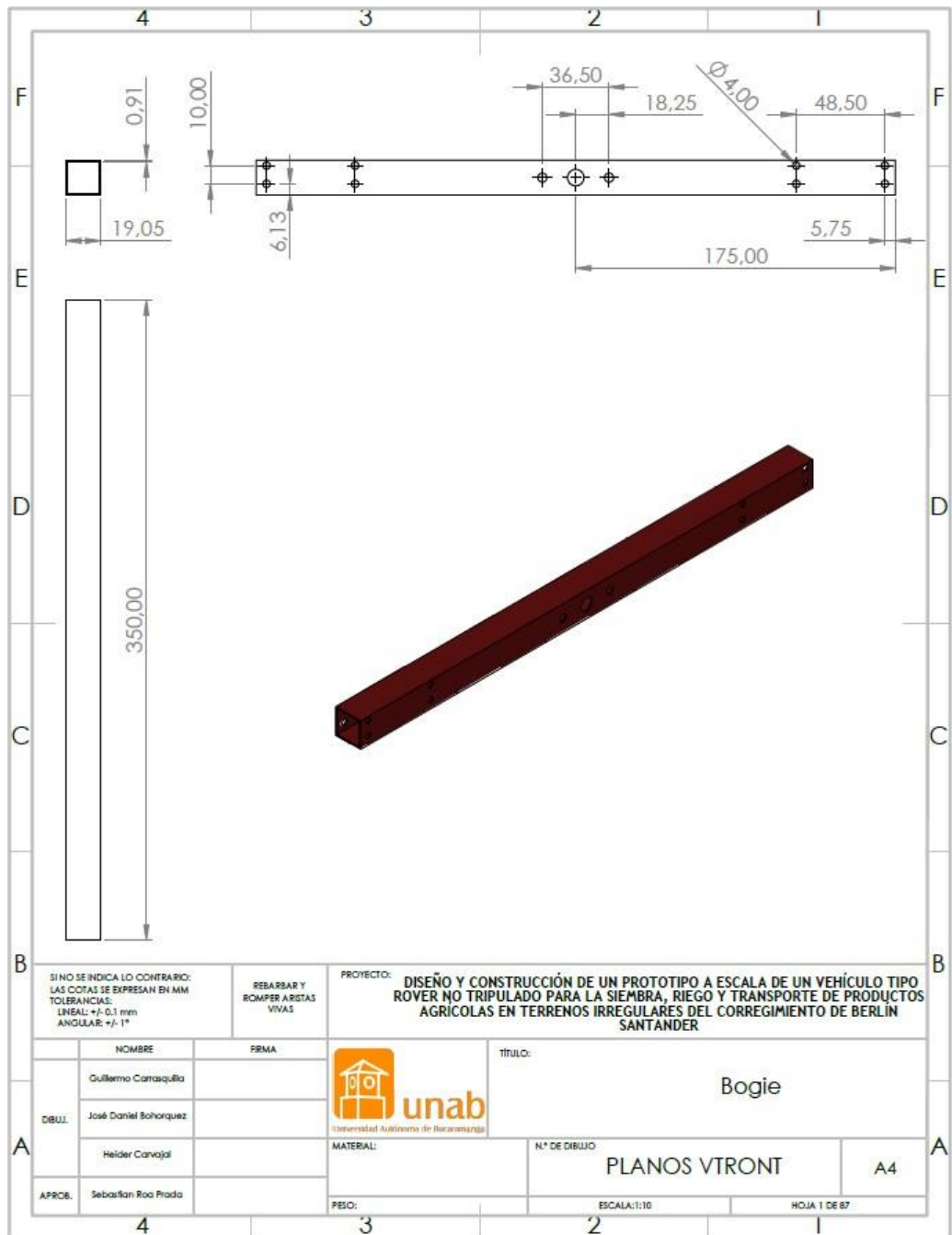


Ilustración 162 Plano pieza principal del bogie (pieza 1 del ensamble del bogie).

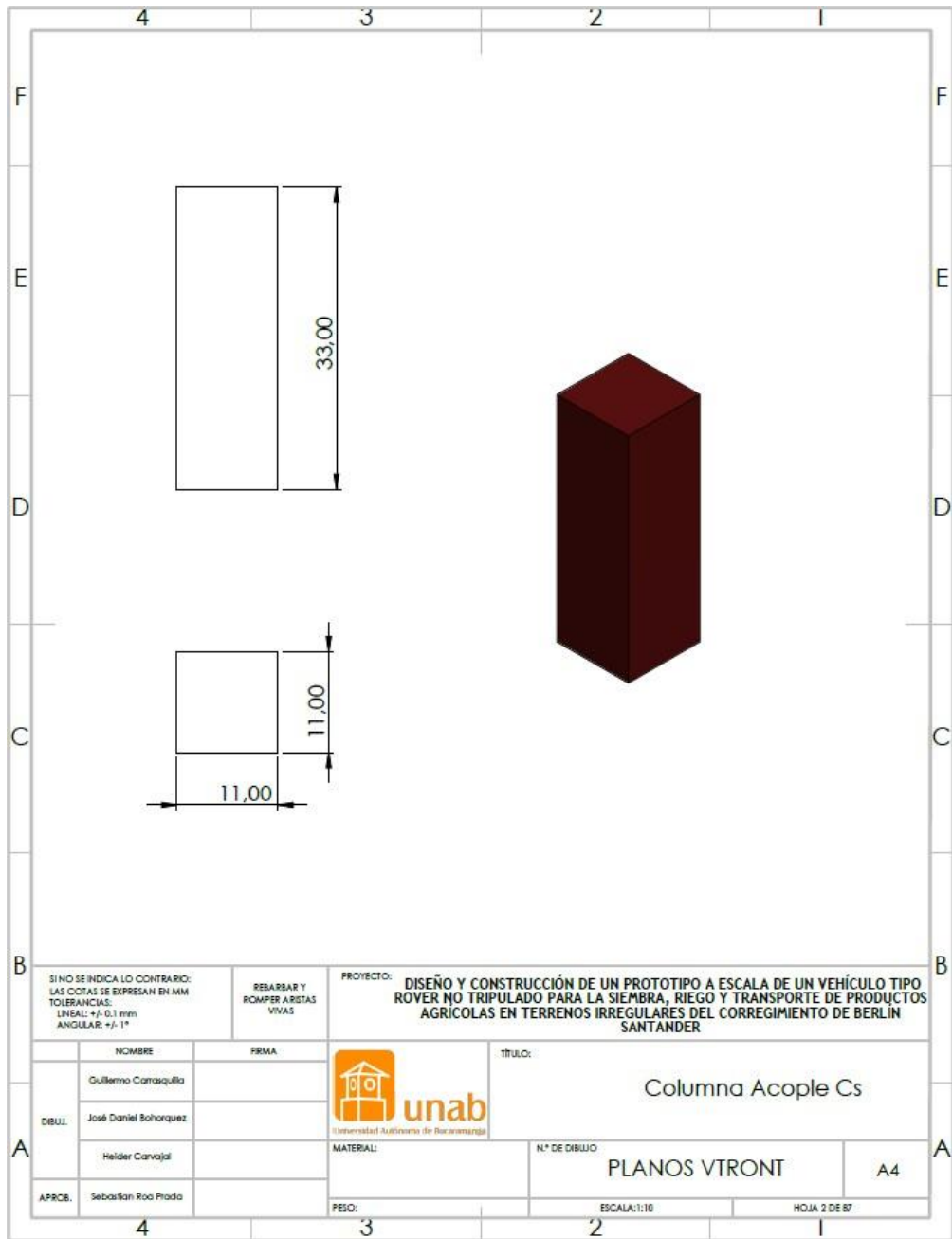


Ilustración 163 Plano de soporte de los rodamientos cónicos (pieza 2 del ensamble).

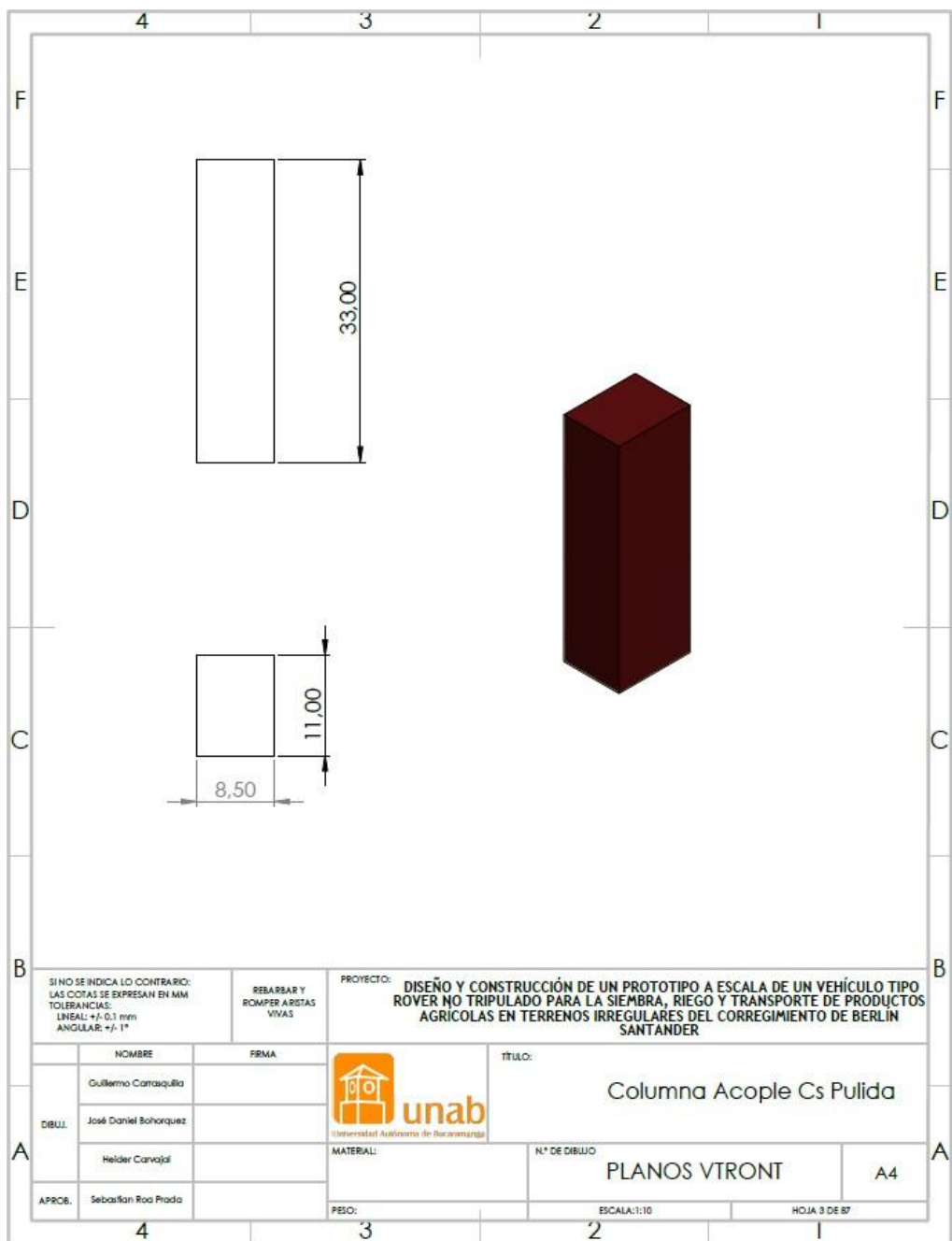


Ilustración 164 Plano de soporte de los rodamientos cónicos (pieza 3 del ensamble).

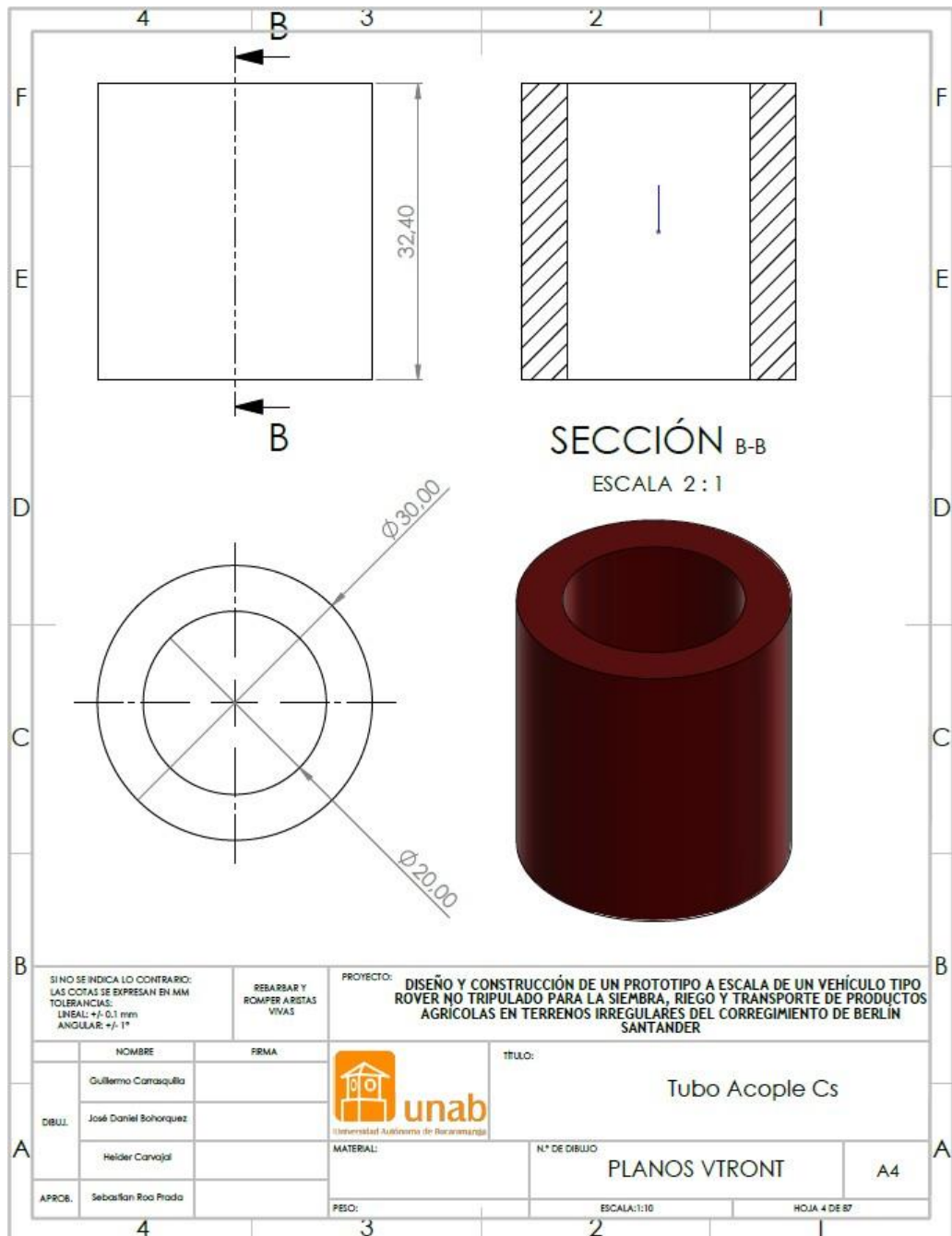


Ilustración 165 Plano de corte de tubería redonda para la camisa de las c's.

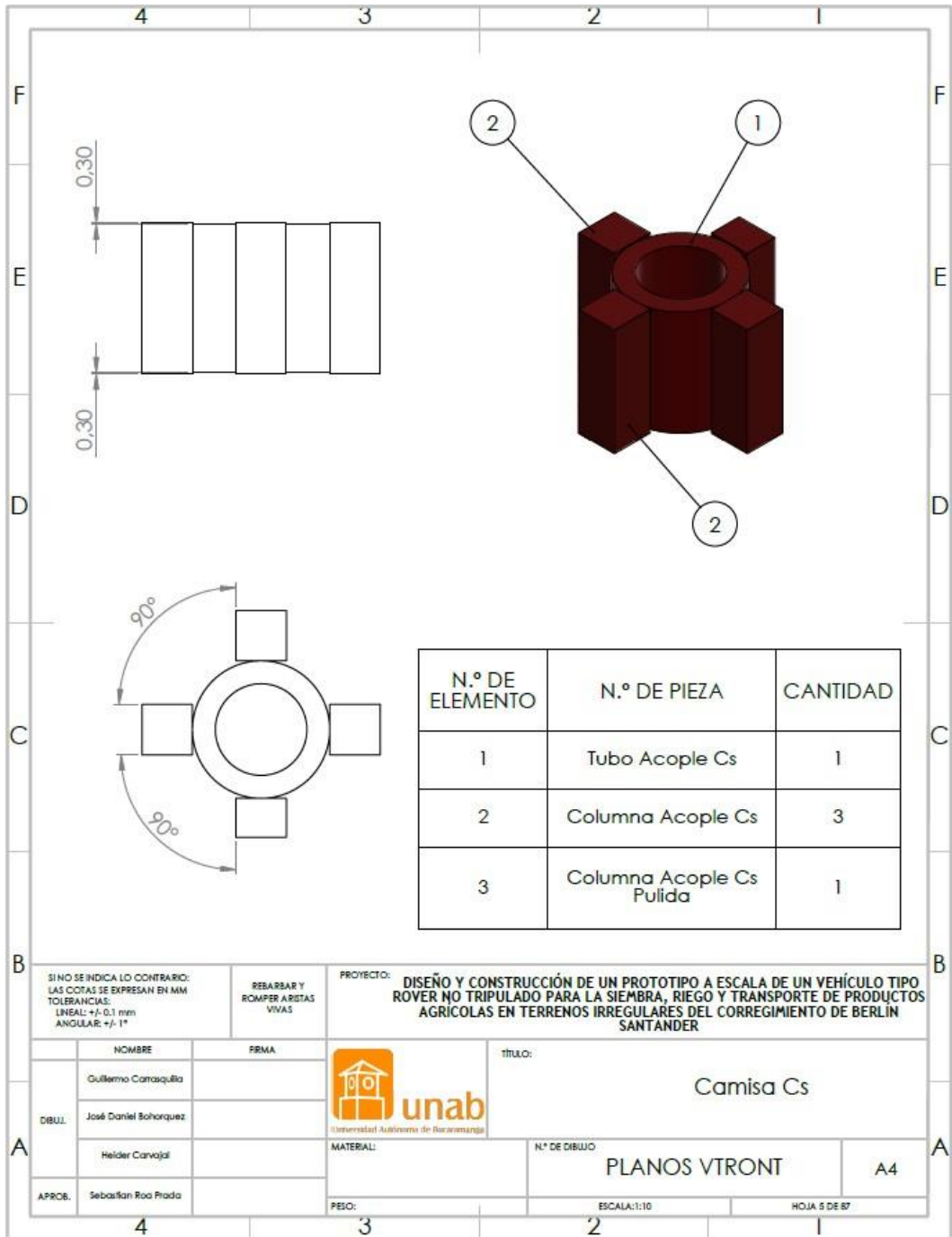


Ilustración 166 Plano de ensamble de la camisa de las c's.

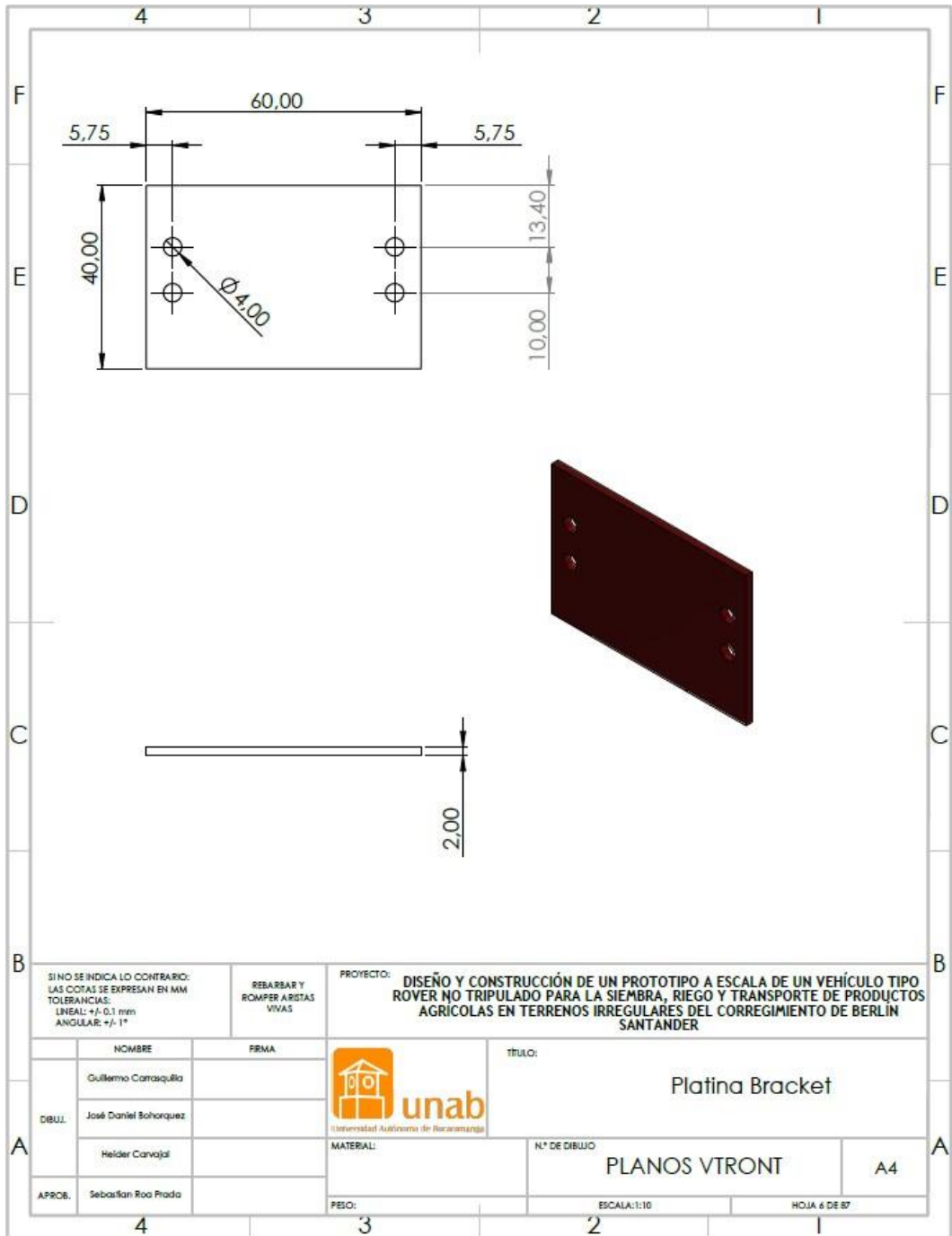


Ilustración 167 Plano de la platina para acople de los brackets de servo.

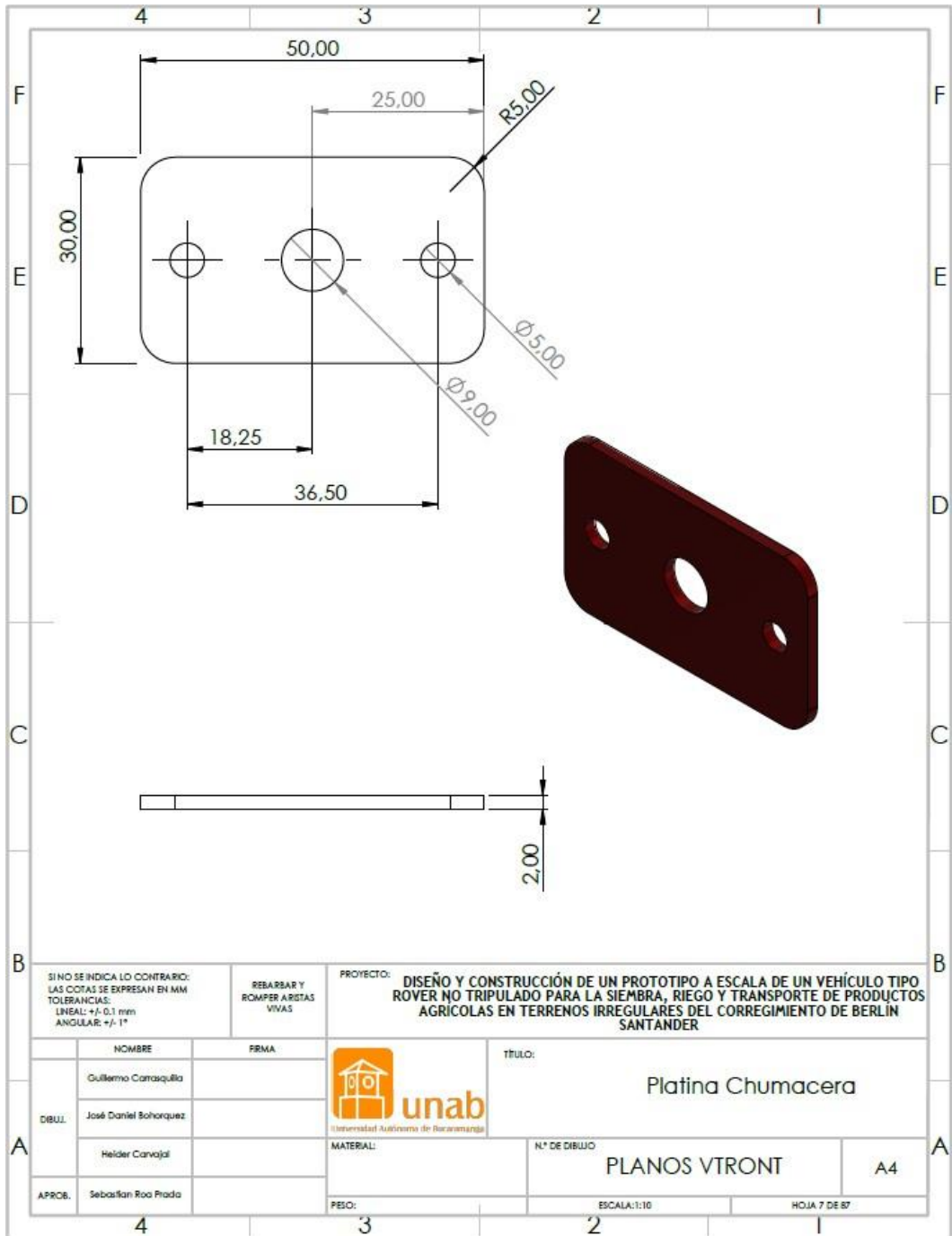


Ilustración 168 Plano de la platina para el acople de la chumacera.

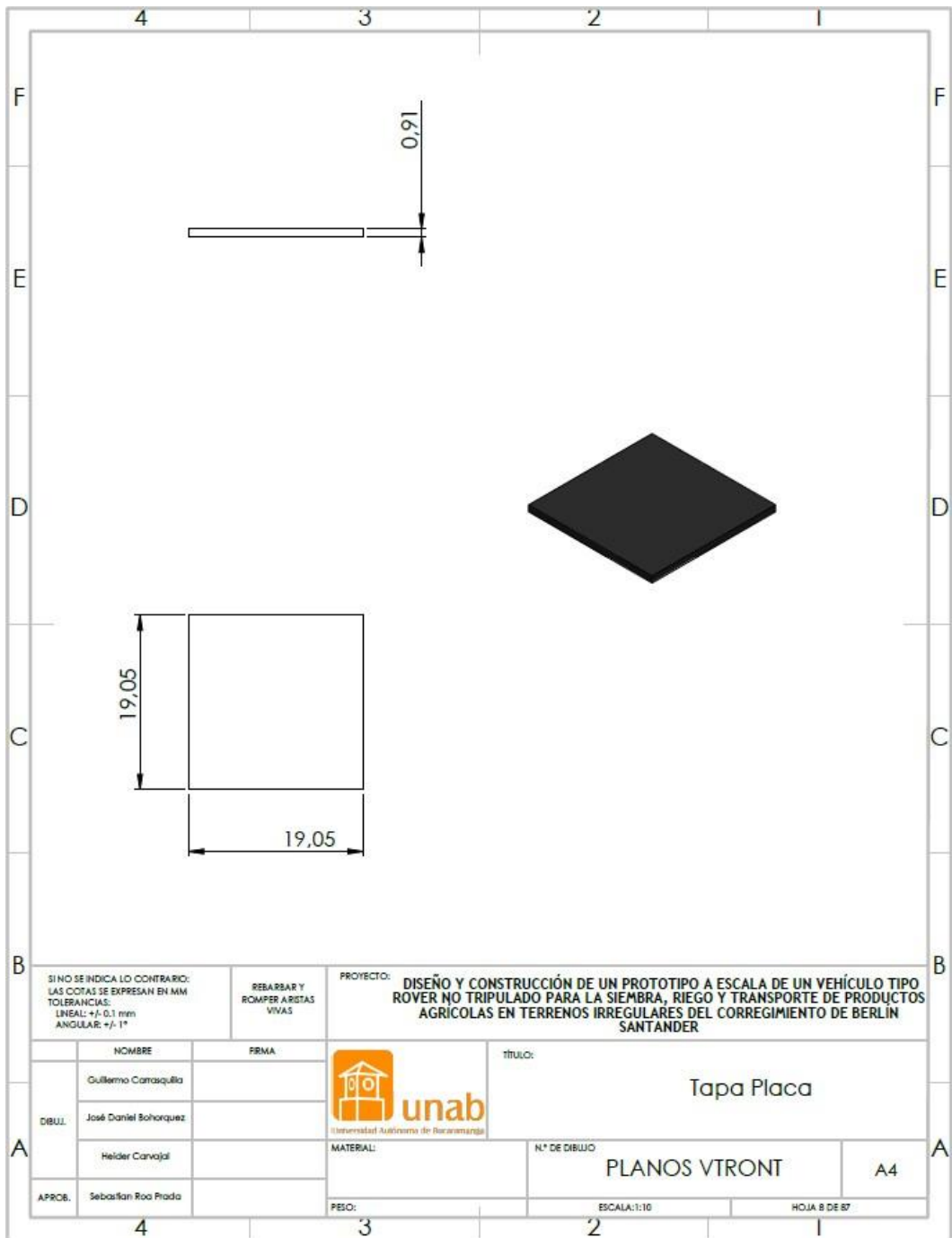


Ilustración 169 Plano tapas de tubo cuadrado de 3/4".

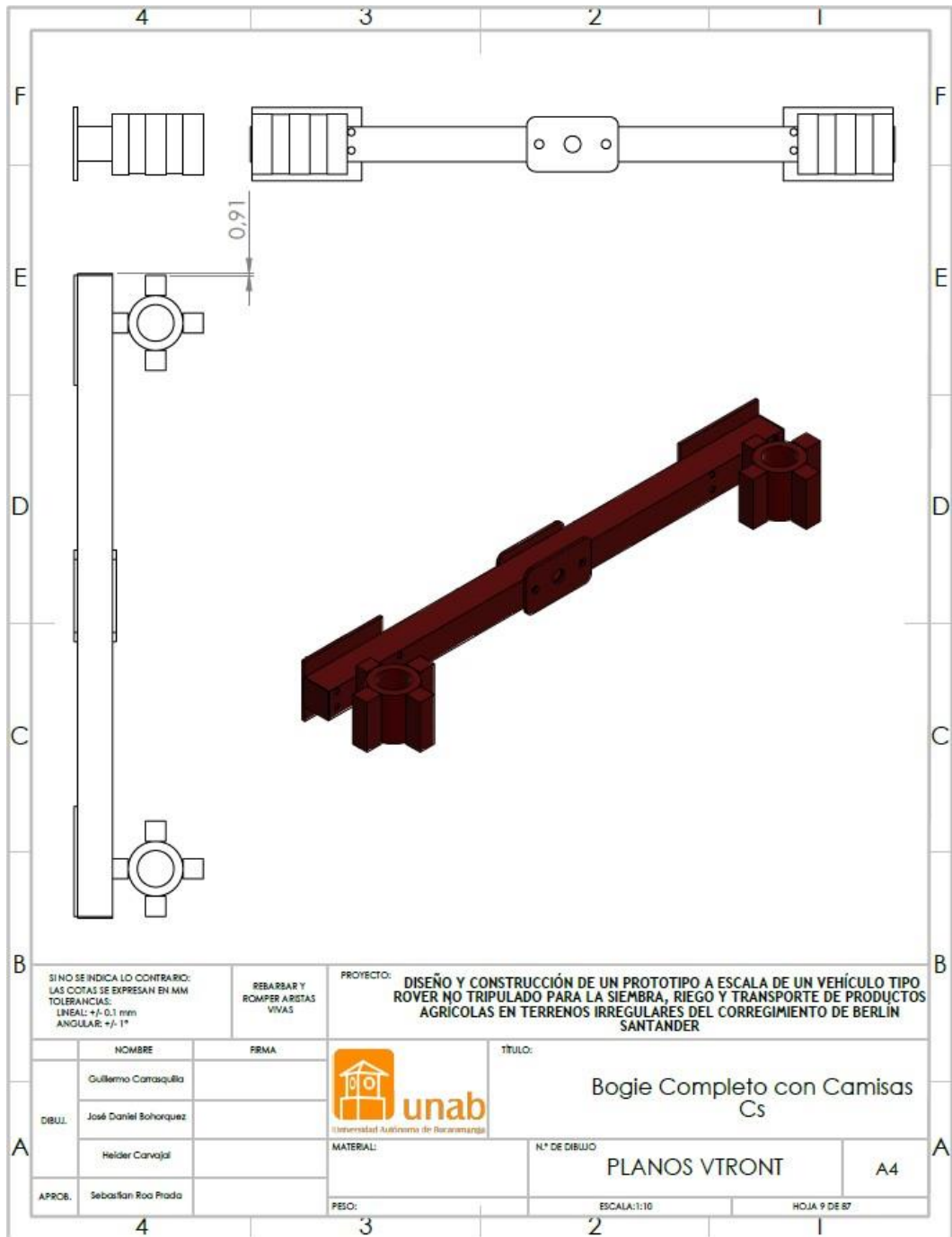


Ilustración 170 Plano de ensamble del bogie.

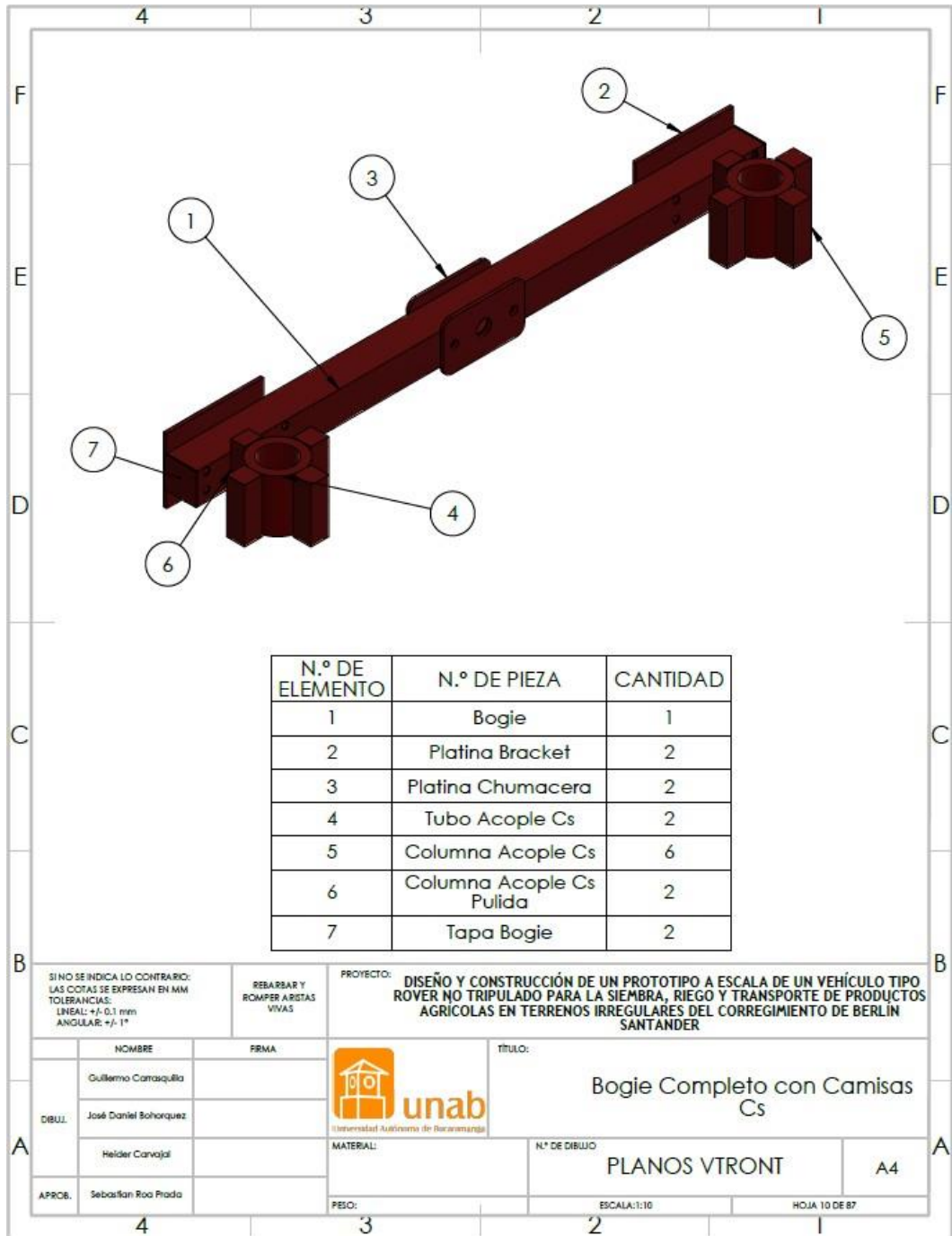


Ilustración 171 Partes y cantidades que componen al bogie.

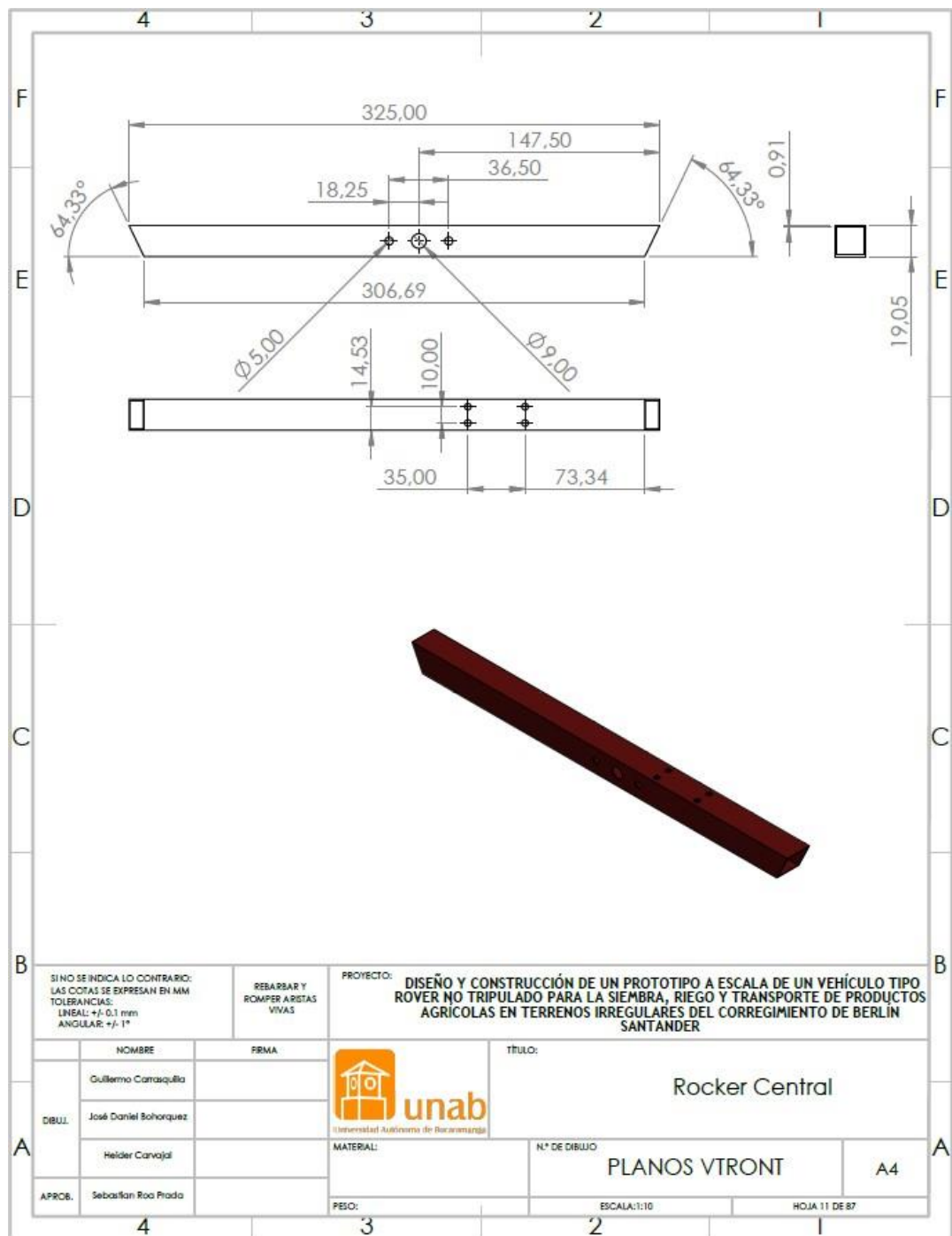


Ilustración 172 Plano parte central del rocker.

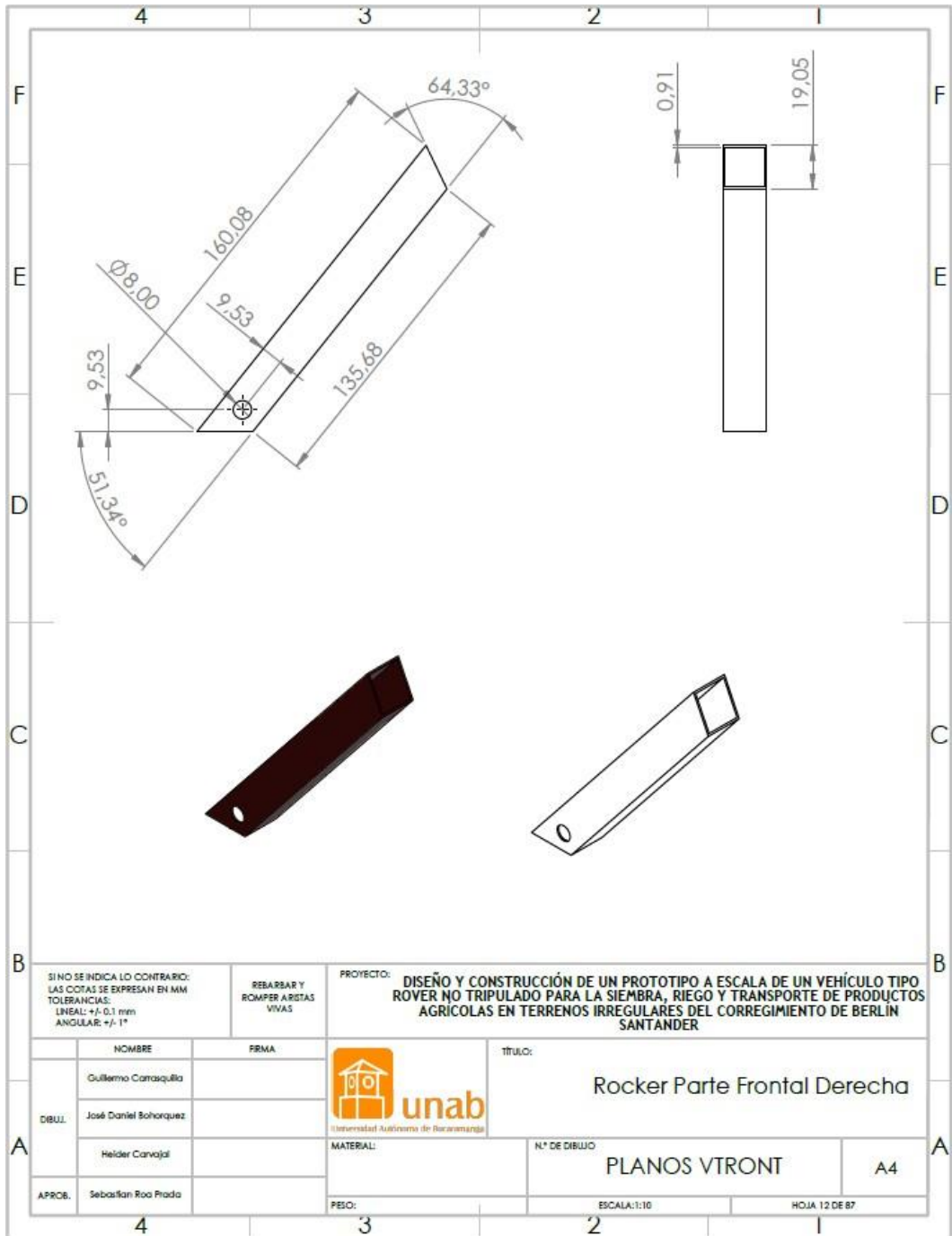


Ilustración 173 Plano parte frontal del rocker derecho.

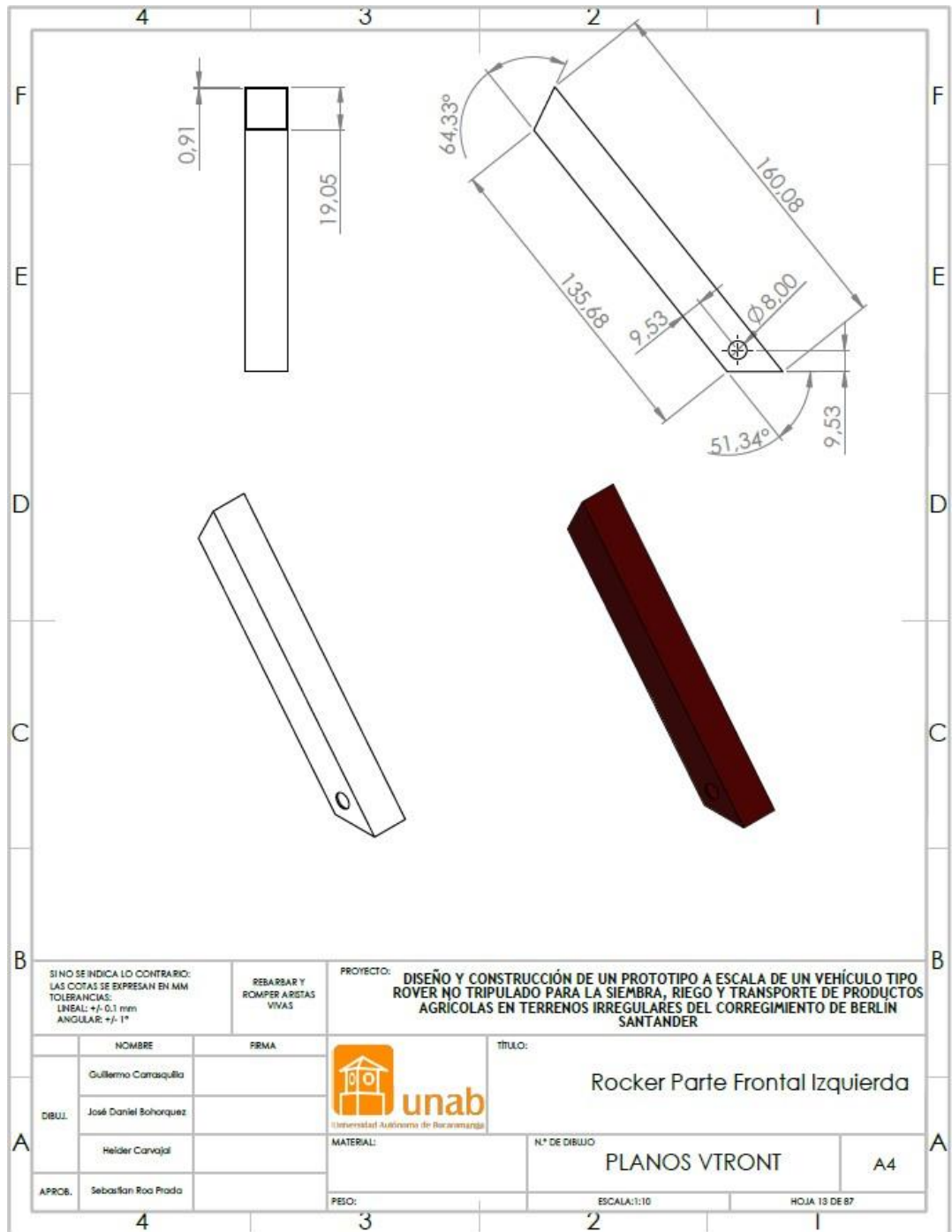
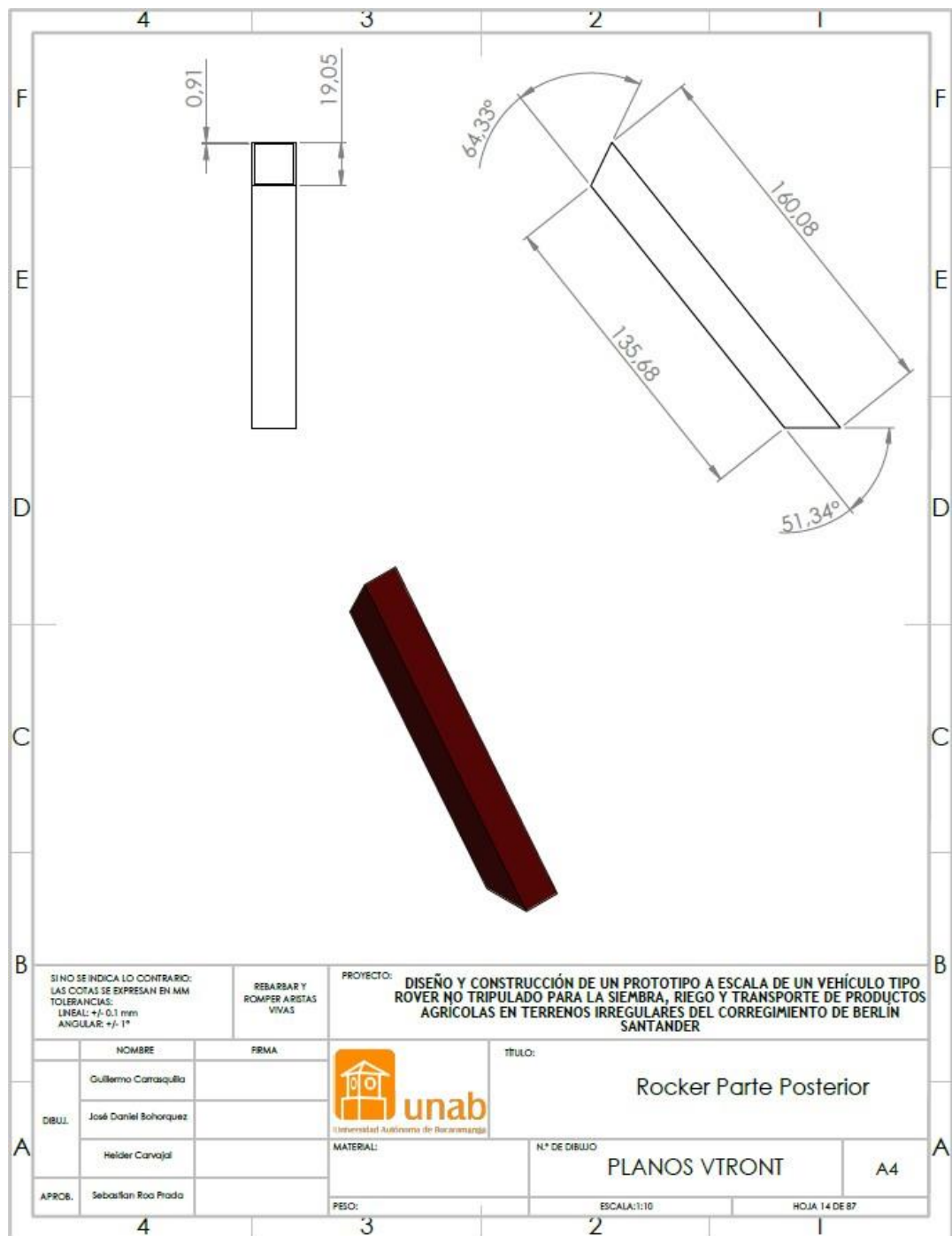


Ilustración 174 Plano parte frontal del rocker izquierdo.



SIN O SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: LINEAL: +/- 0.1 mm ANGULAR: +/- 1°		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE UN VEHÍCULO TIPO ROVER NO TRIPULADO PARA LA SIEMBRA, RIEGO Y TRANSPORTE DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS EN TERRENOS IRREGULARES DEL CORREGIMIENTO DE BERLÍN SANTANDER	
DIBUJ. APROB.	NOMBRE Guillermo Carrasquilla	FIRMA	 Universidad Autónoma de Bucaramanga	TÍTULO: Rocker Parte Posterior
	José Daniel Bohorquez			N° DE DIBUJO PLANOS VTRONT
	Helder Carvajal			A4
	Sebastián Roo Prada		PESO:	ESCALA: 1:10 HOJA 14 DE 87

Ilustración 175 Plano parte posterior del rocker.

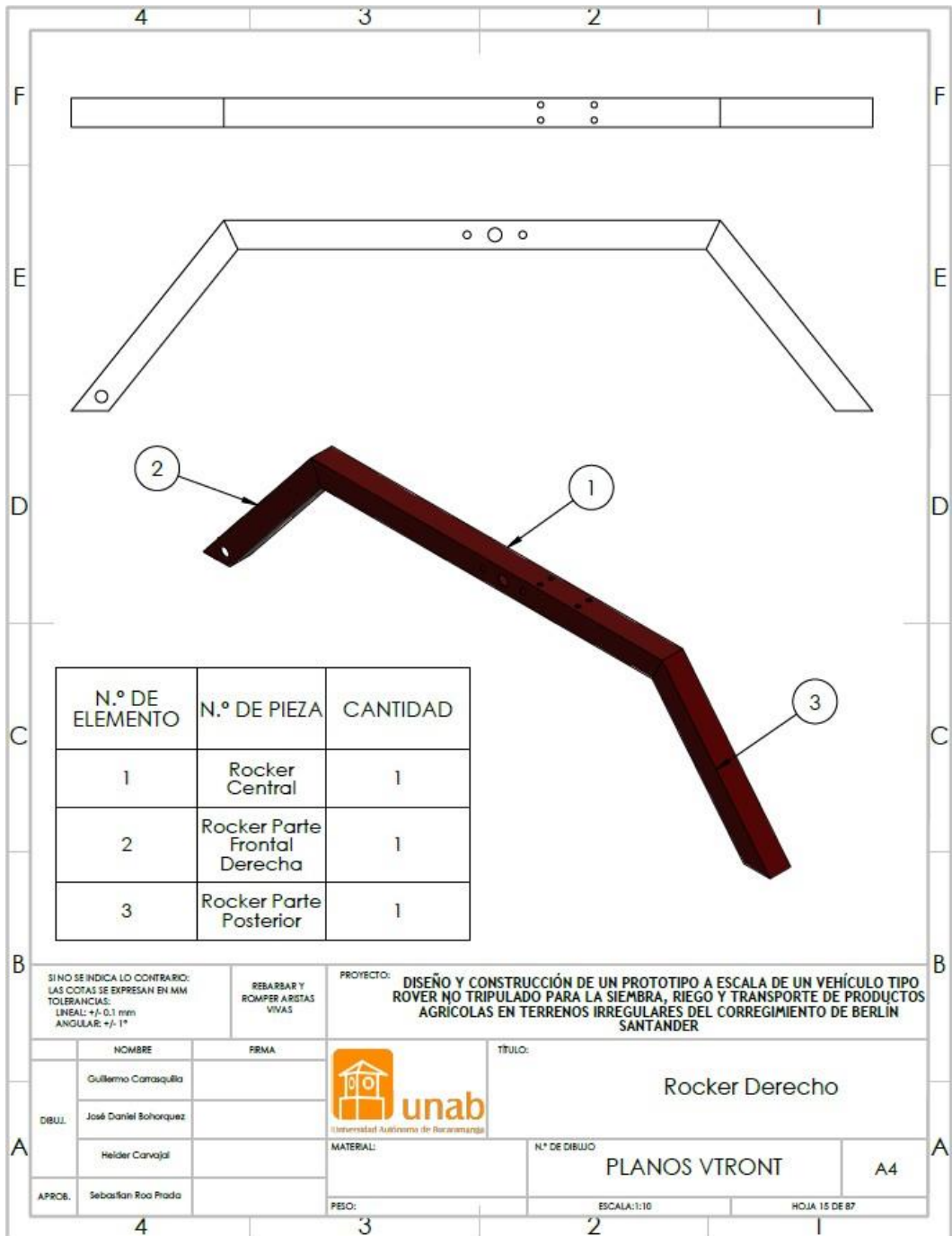


Ilustración 176 Ensamble del rocker derecho con sus partes.

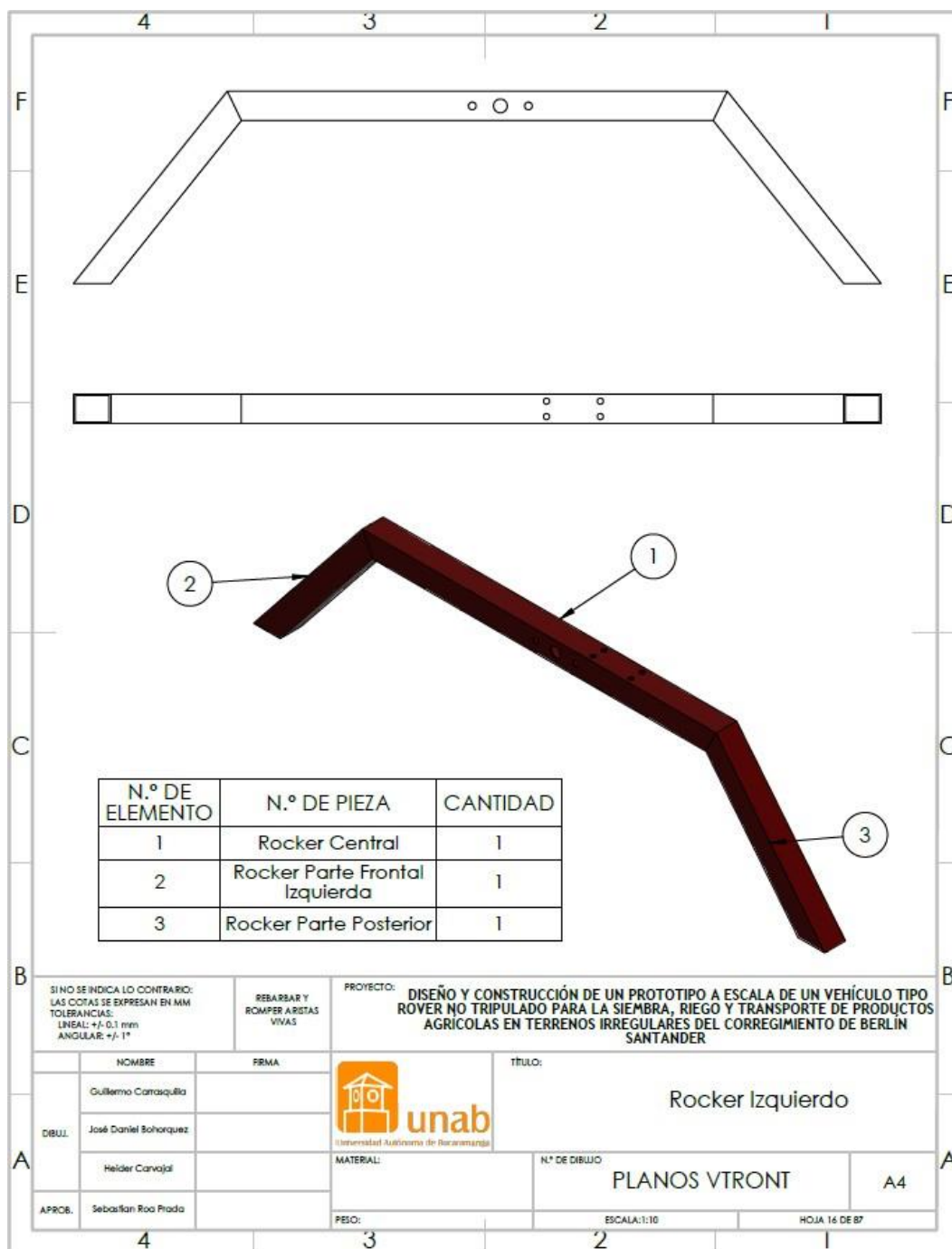


Ilustración 177 Ensamble del rocker izquierdo con sus partes.

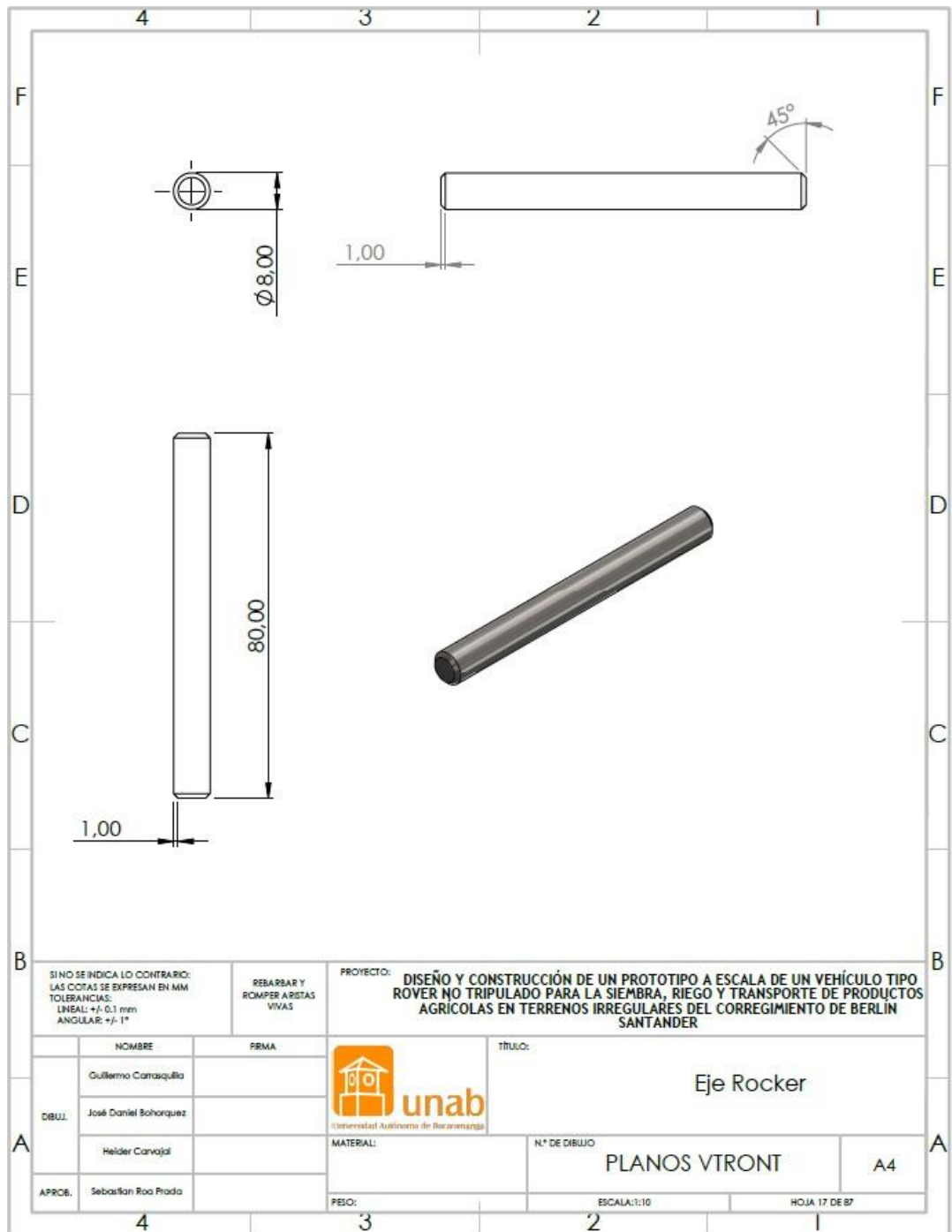


Ilustración 178 Plano del eje del rocker.

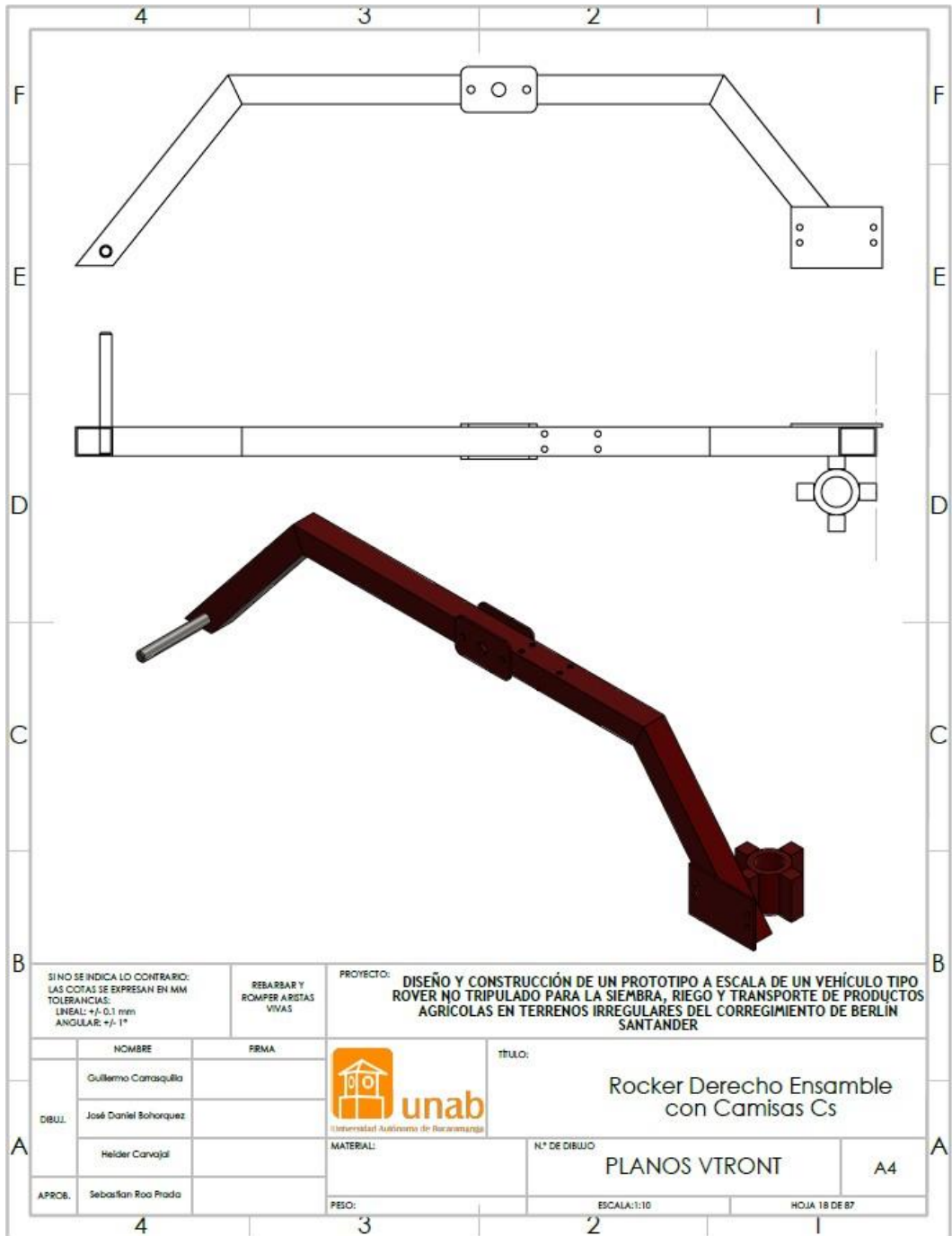


Ilustración 179 Plano de ensamble completo del rocker derecho.

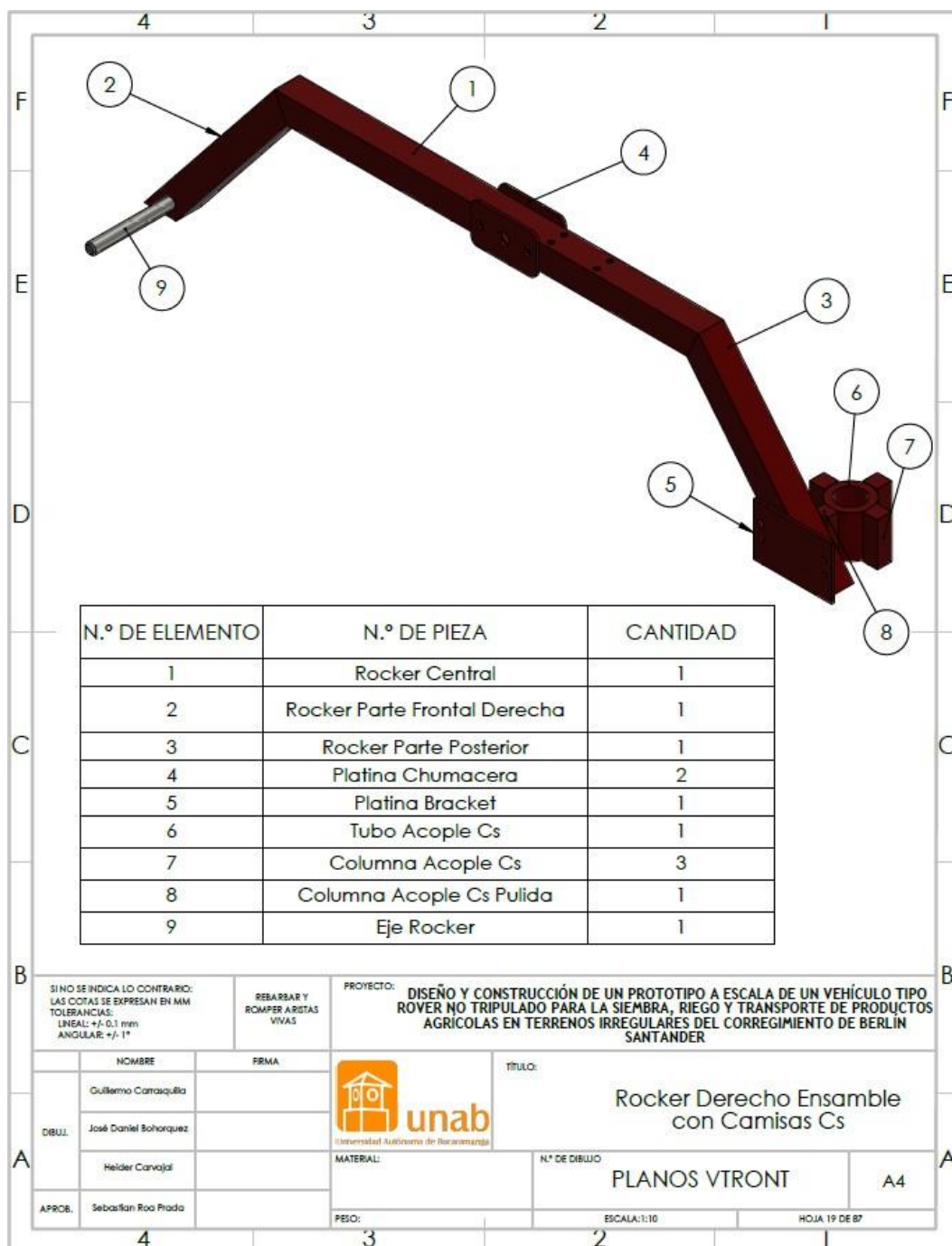


Ilustración 180 Partes del rocker derecho completo.

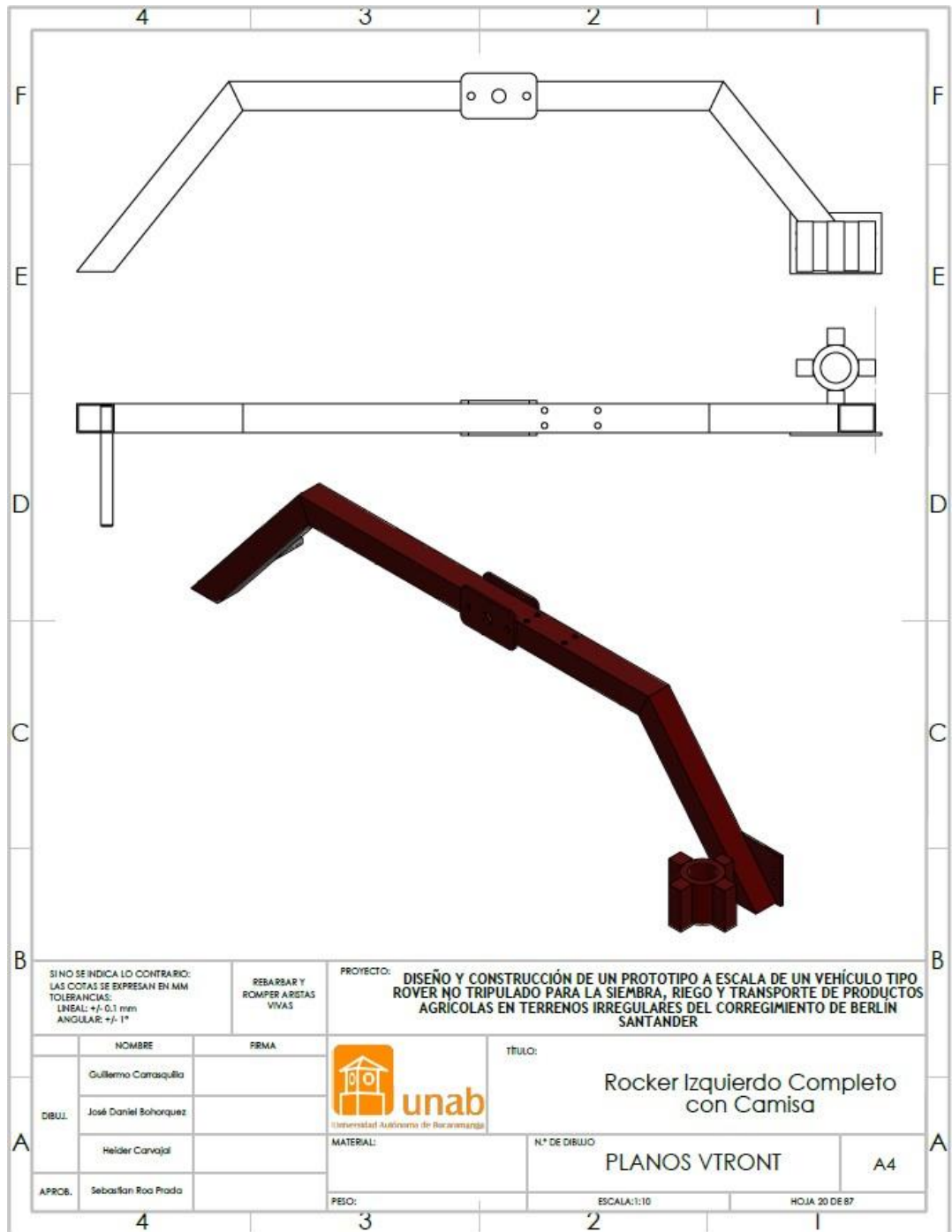


Ilustración 181 Plano de ensamble completo del rocker izquierdo.

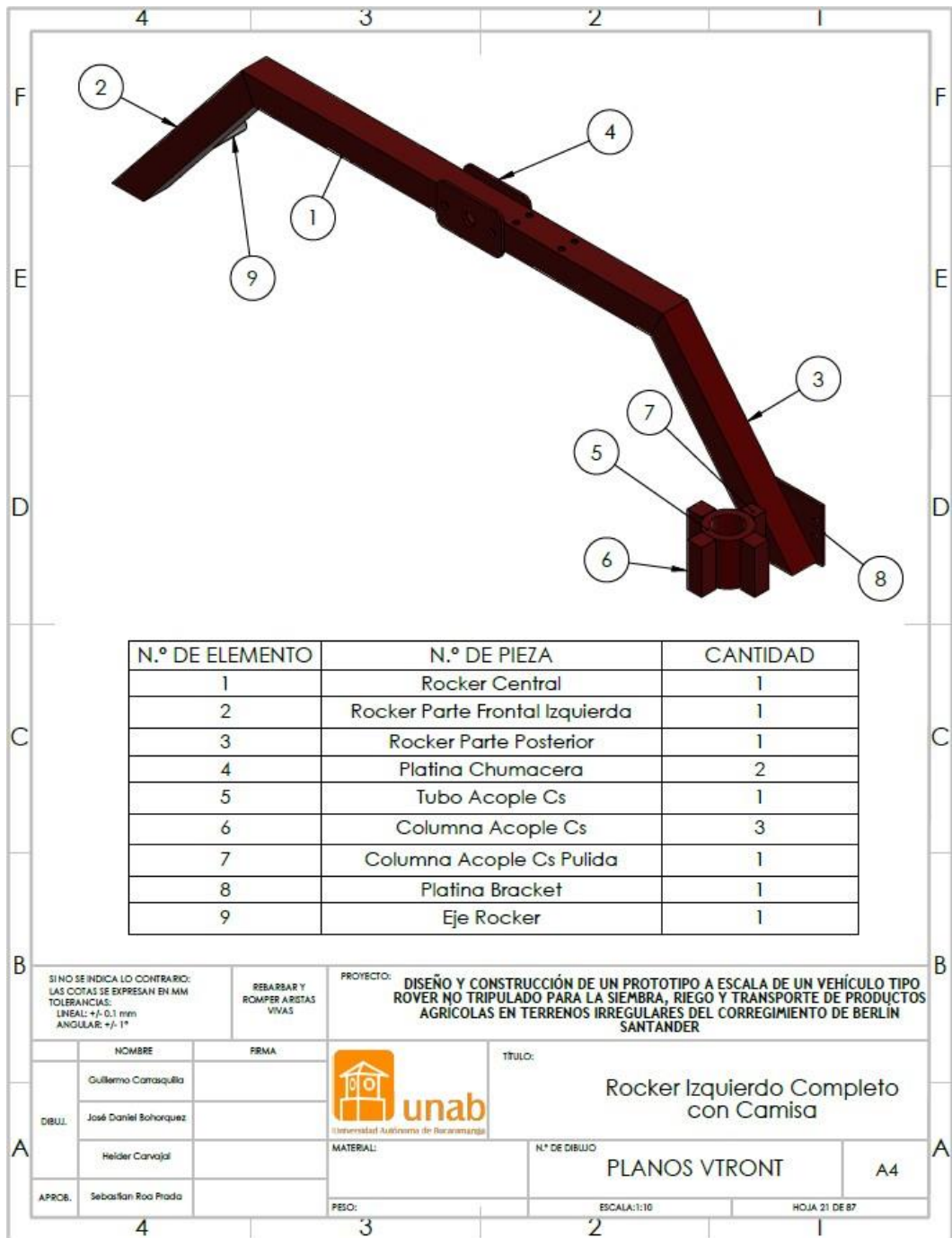


Ilustración 182 Partes del rocker izquierdo completo.

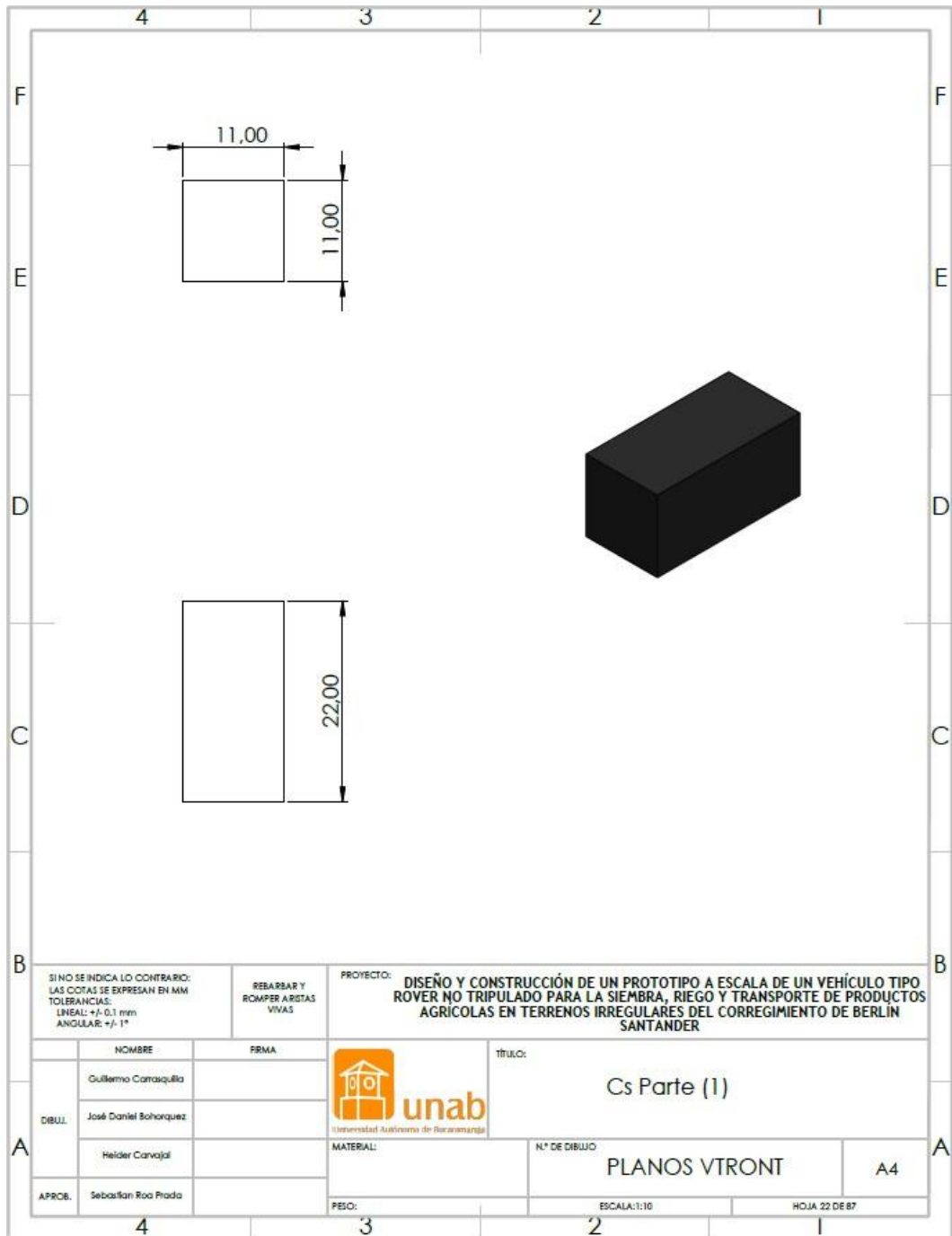


Ilustración 183 Plano de corte de varilla cuadrada de la parte 1.

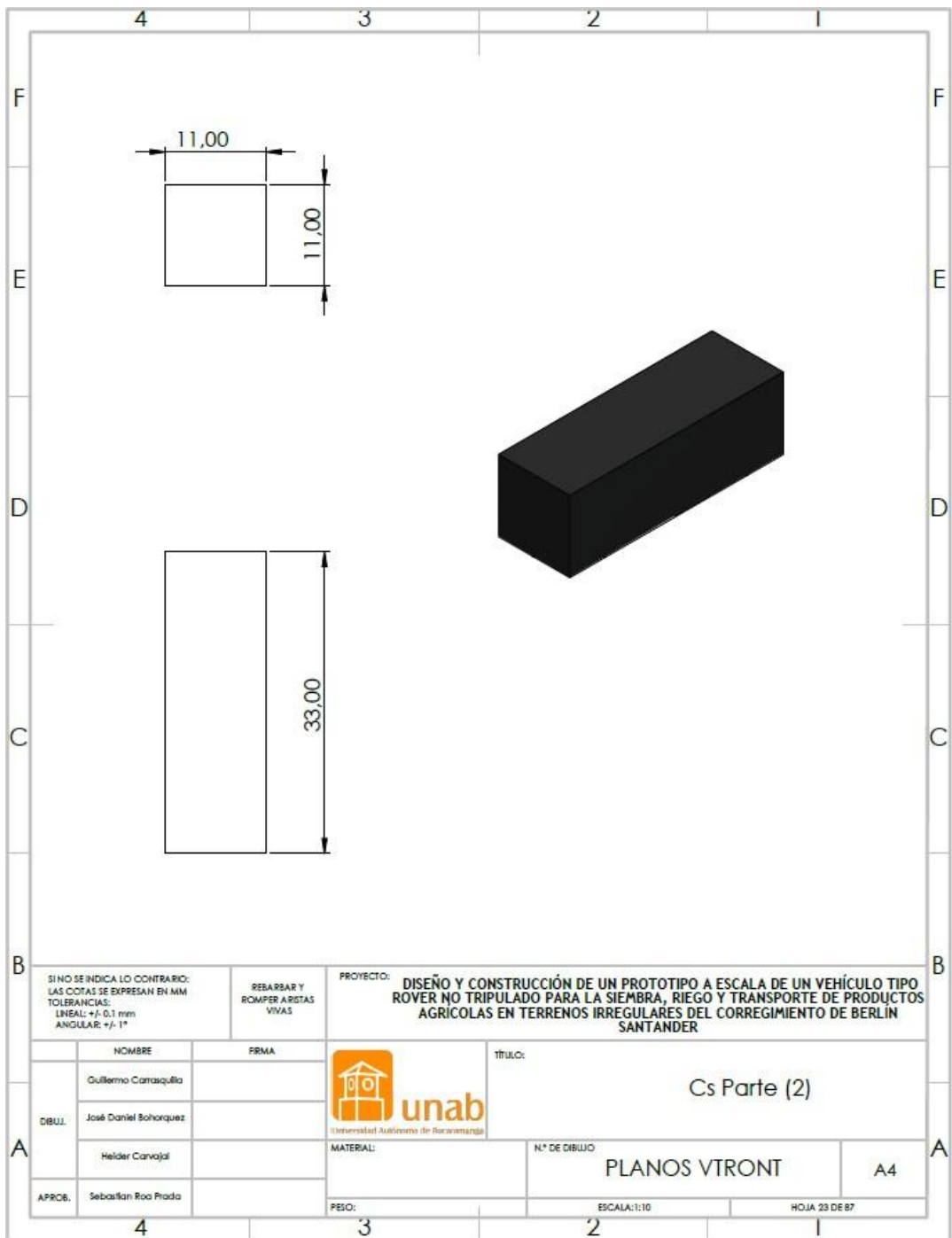


Ilustración 184 Plano de corte de varilla cuadrada de la parte 2.

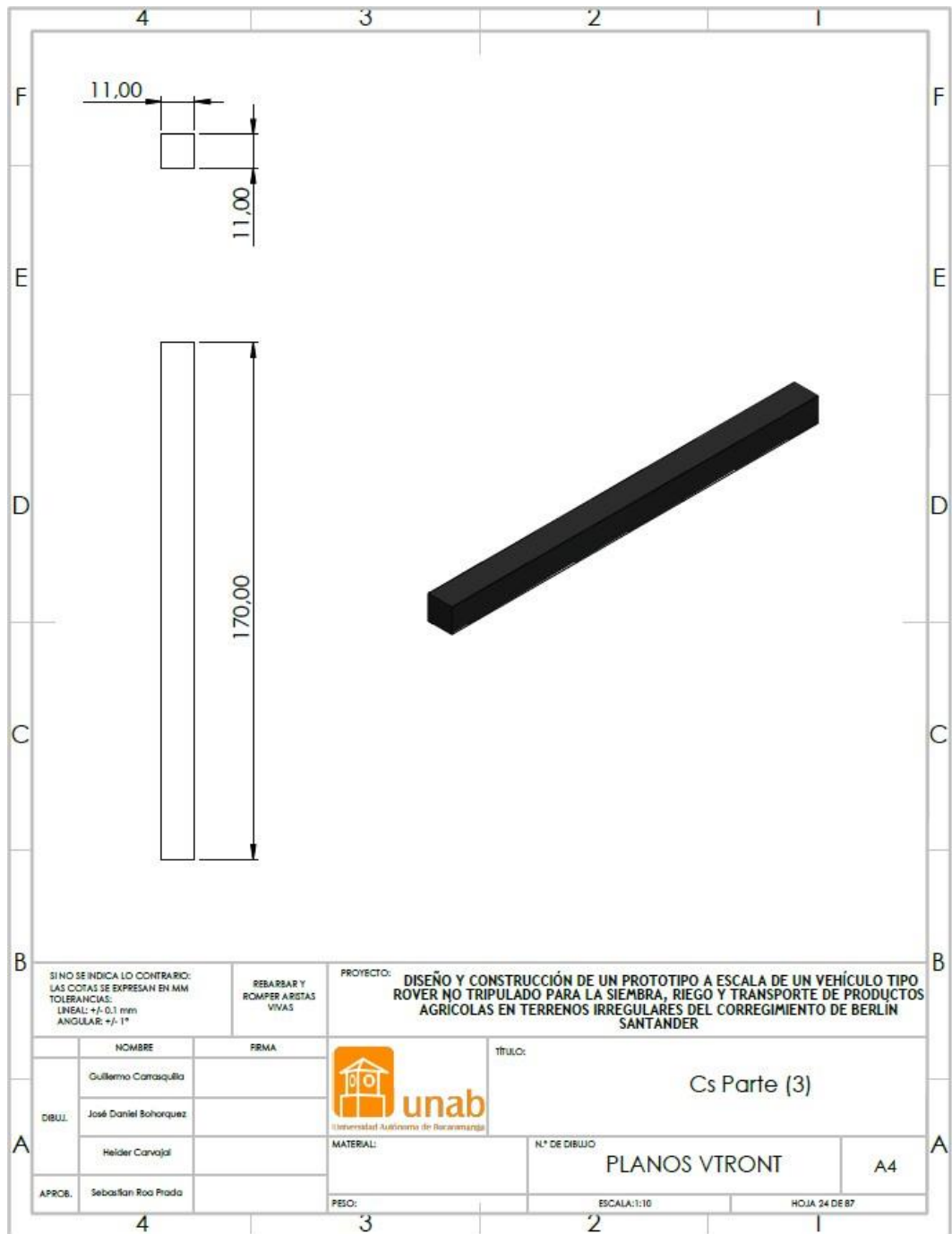


Ilustración 185 Plano de corte de varilla cuadrada de la parte 3.

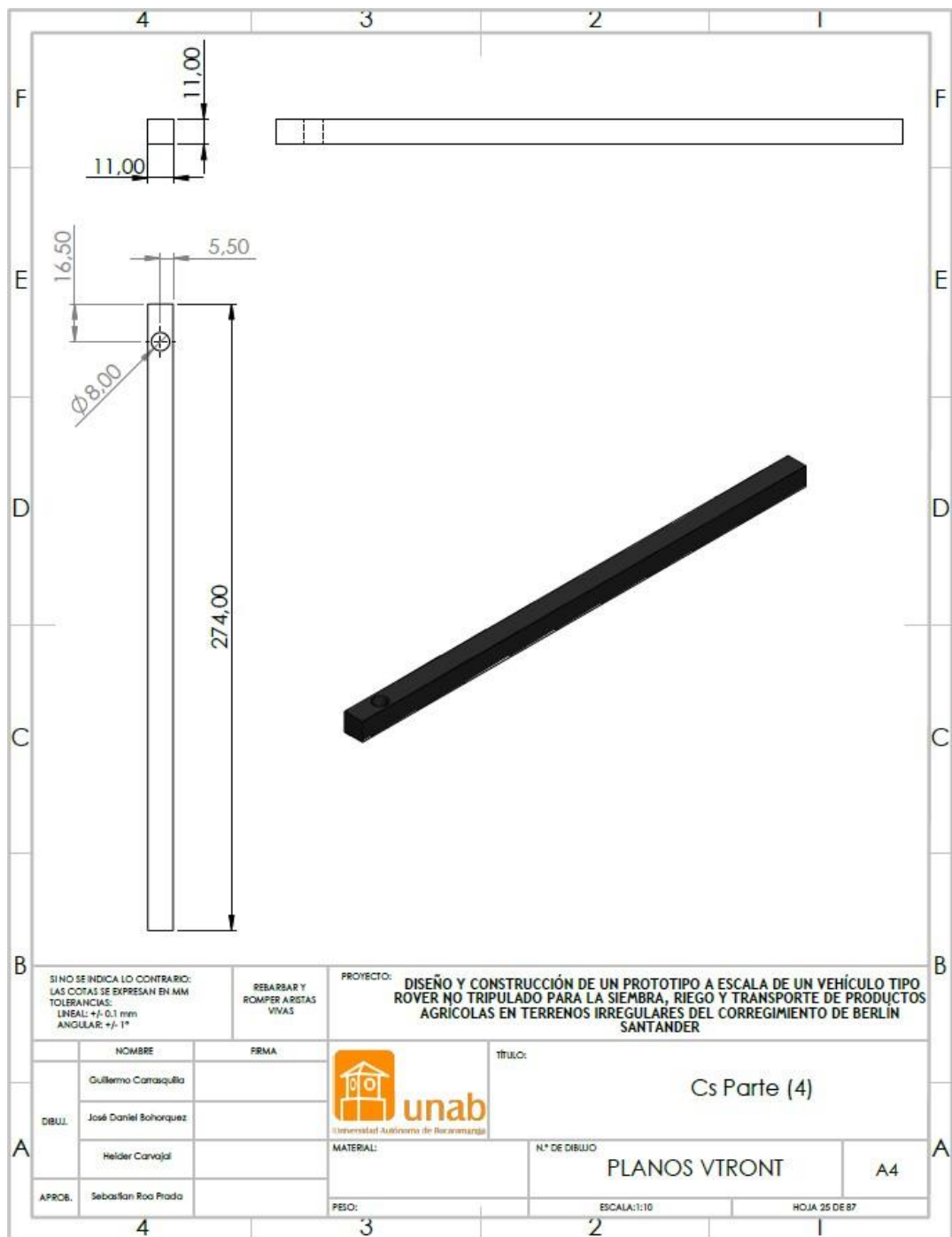


Ilustración 186 Plano de corte de varilla cuadrada de la parte 4.

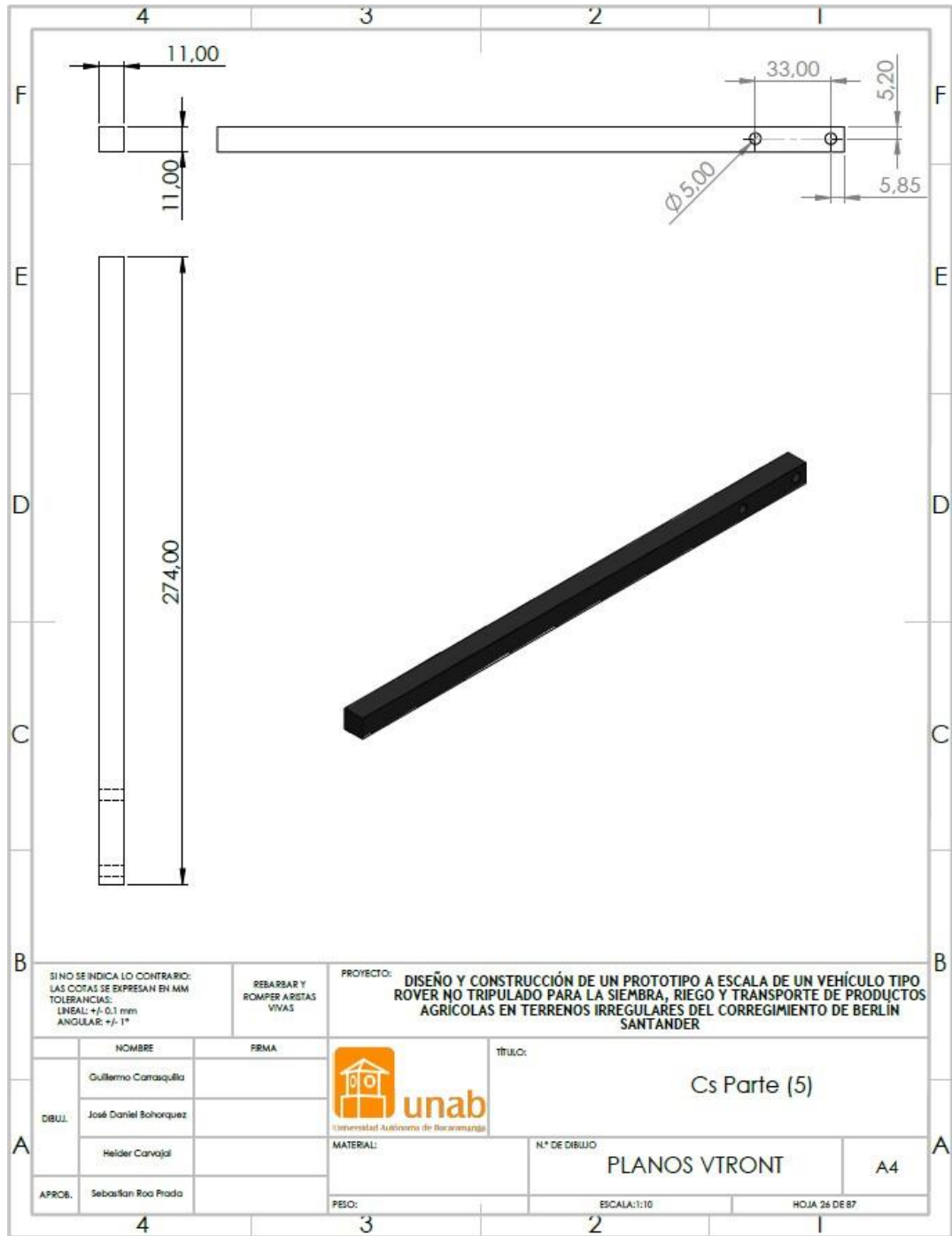


Ilustración 187 Plano de corte de varilla cuadrada de la parte 5.

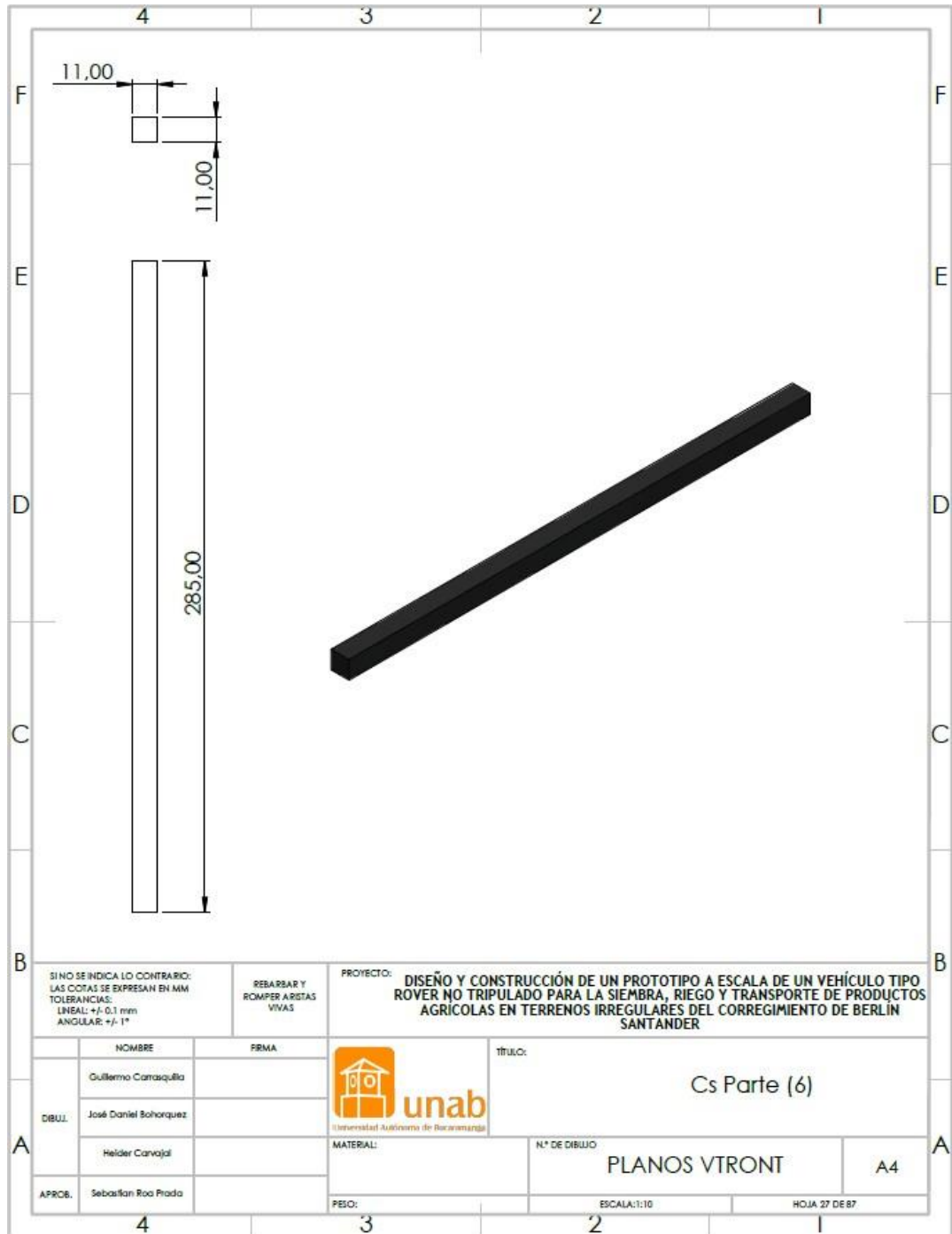


Ilustración 188 Plano de corte de varilla cuadrada de la parte 6.

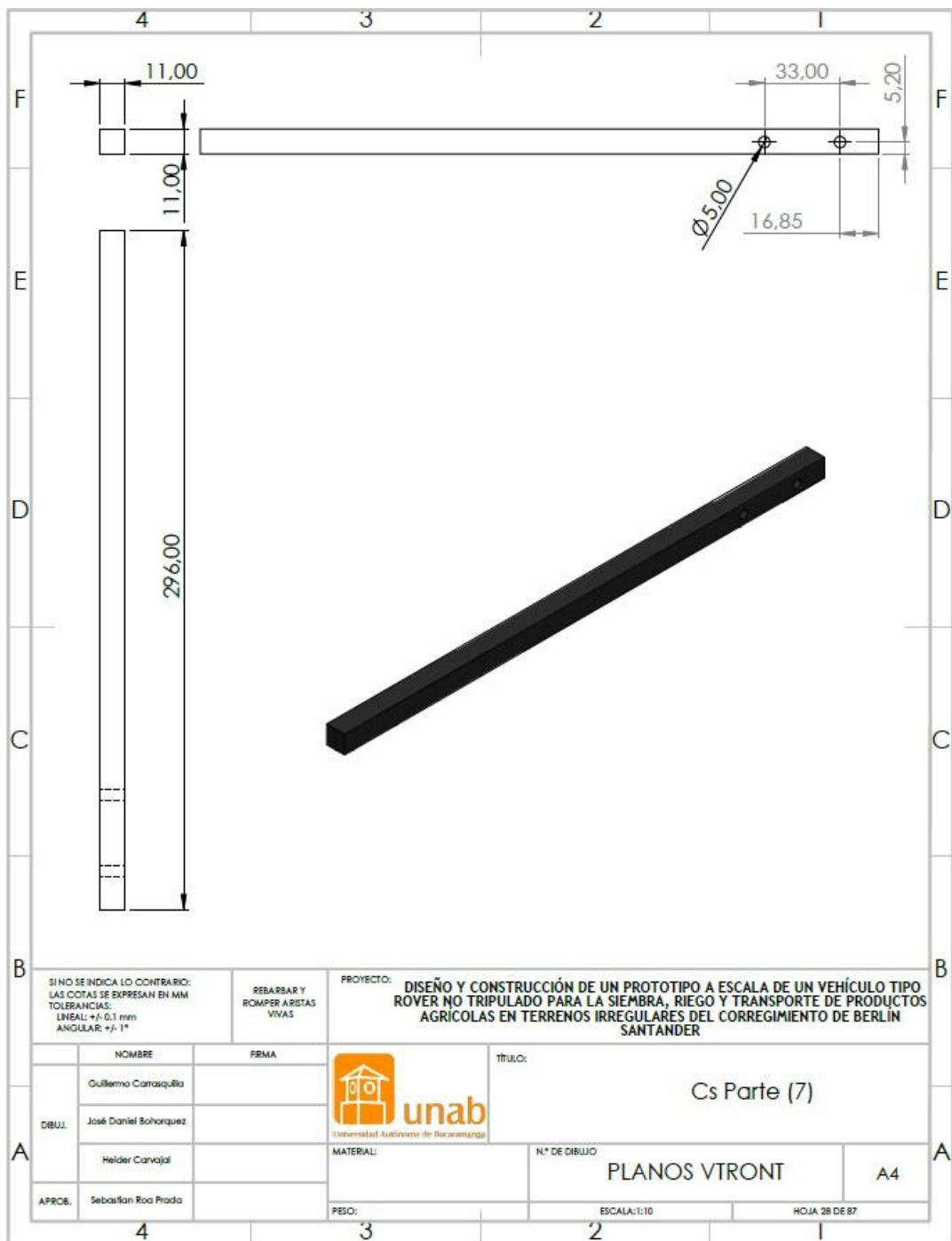


Ilustración 189 Plano de corte de varilla cuadrada de la parte 7.

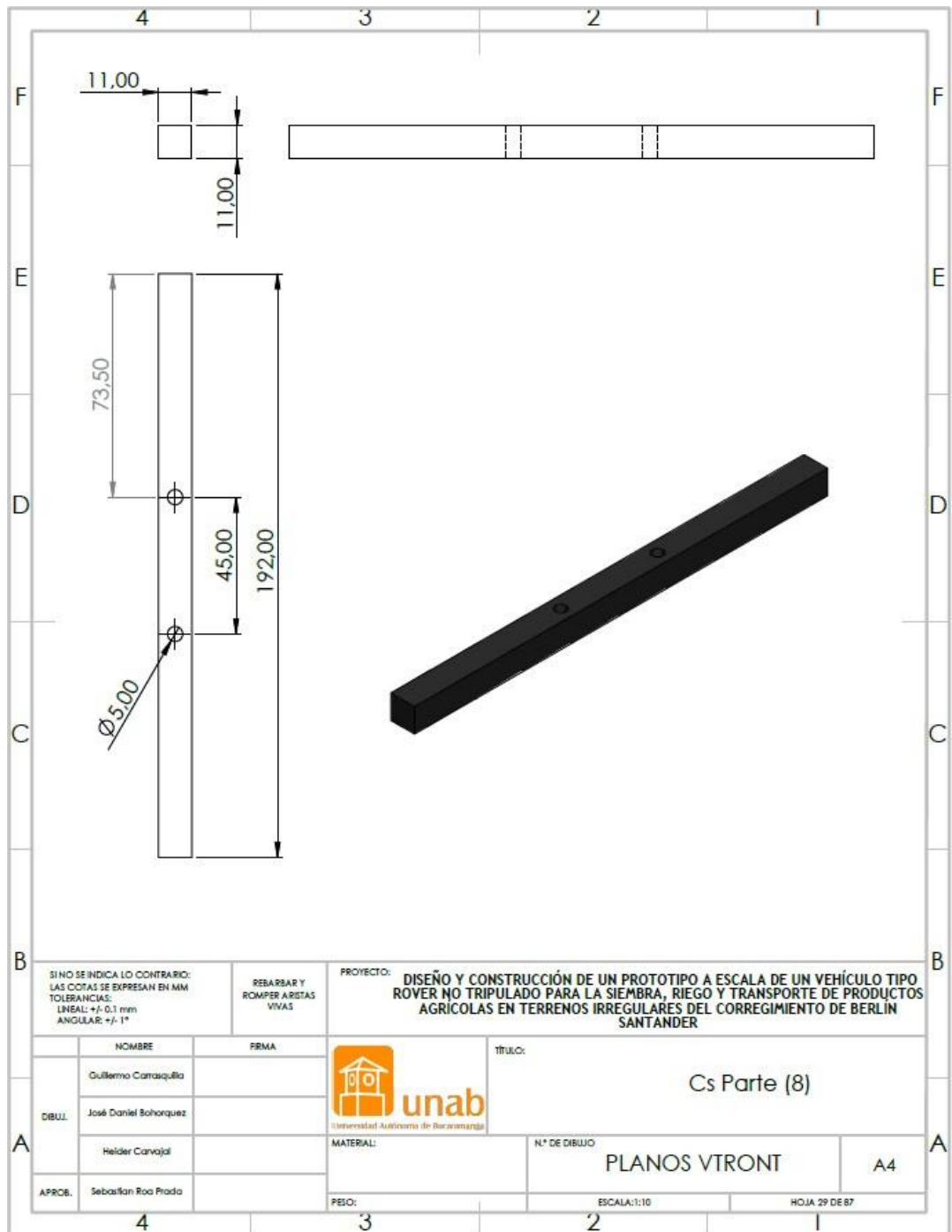


Ilustración 190 Plano de corte de varilla cuadrada de la parte 8.

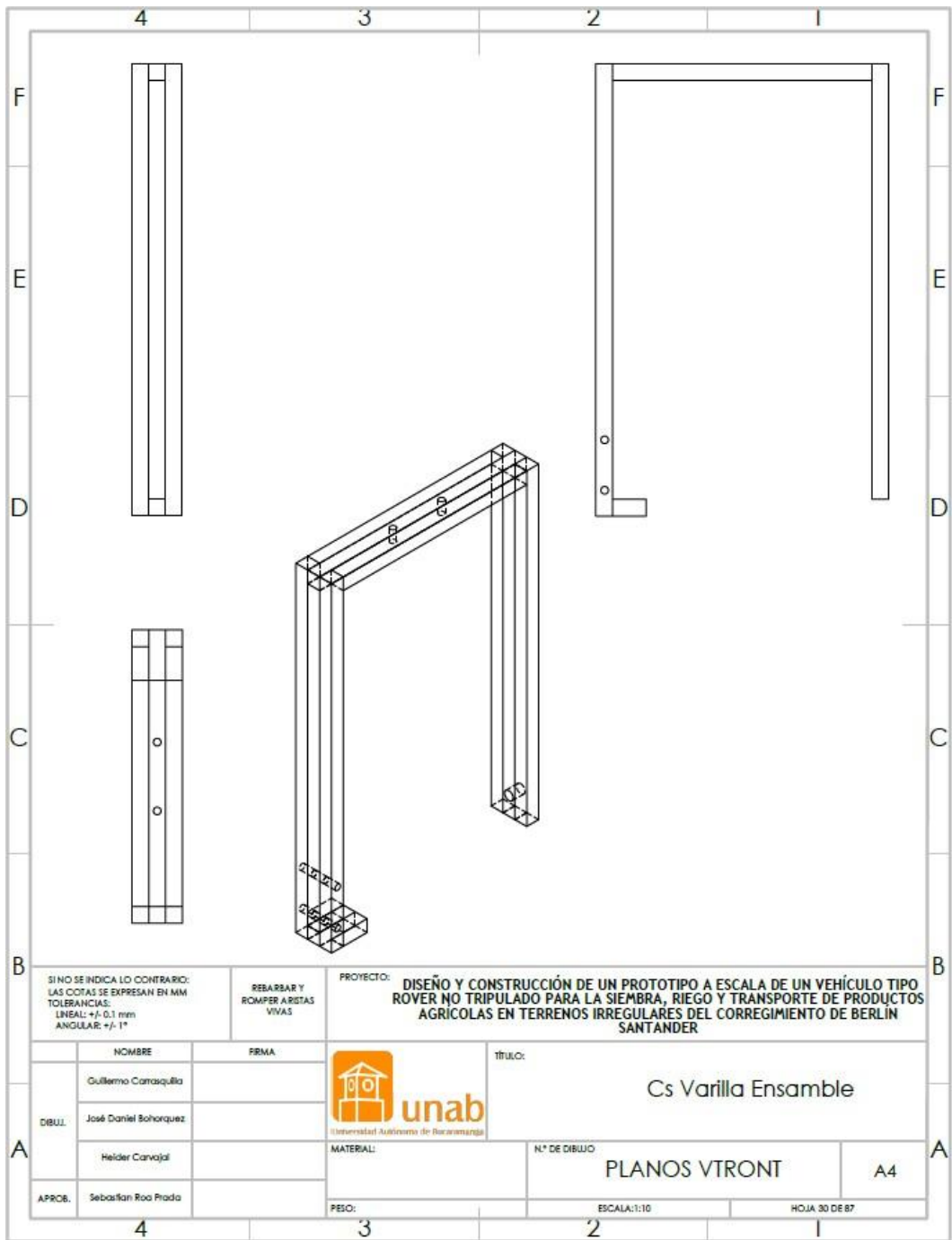


Ilustración 191 Ensamble de la c.

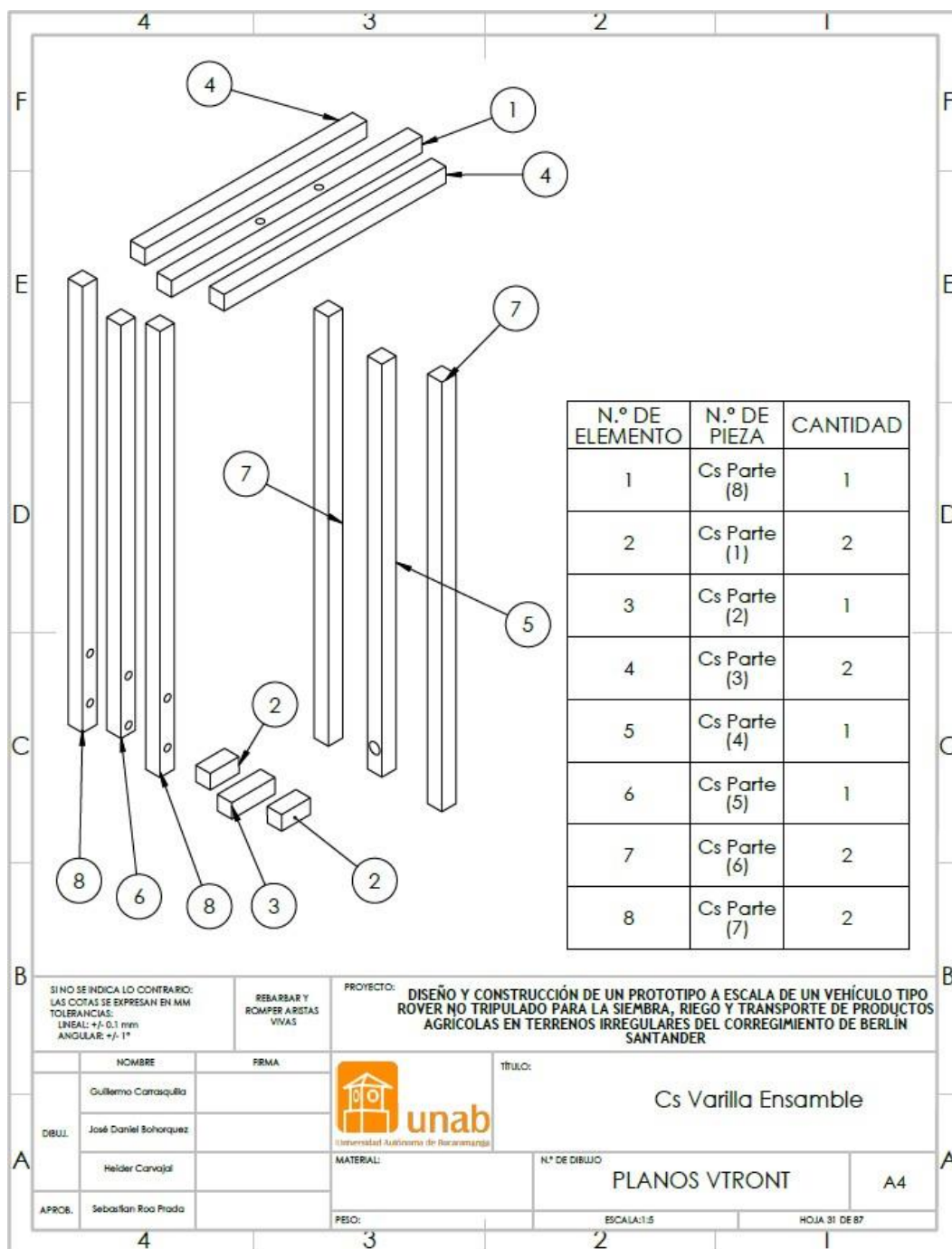


Ilustración 192 Cantidades y partes del ensamble de la c.

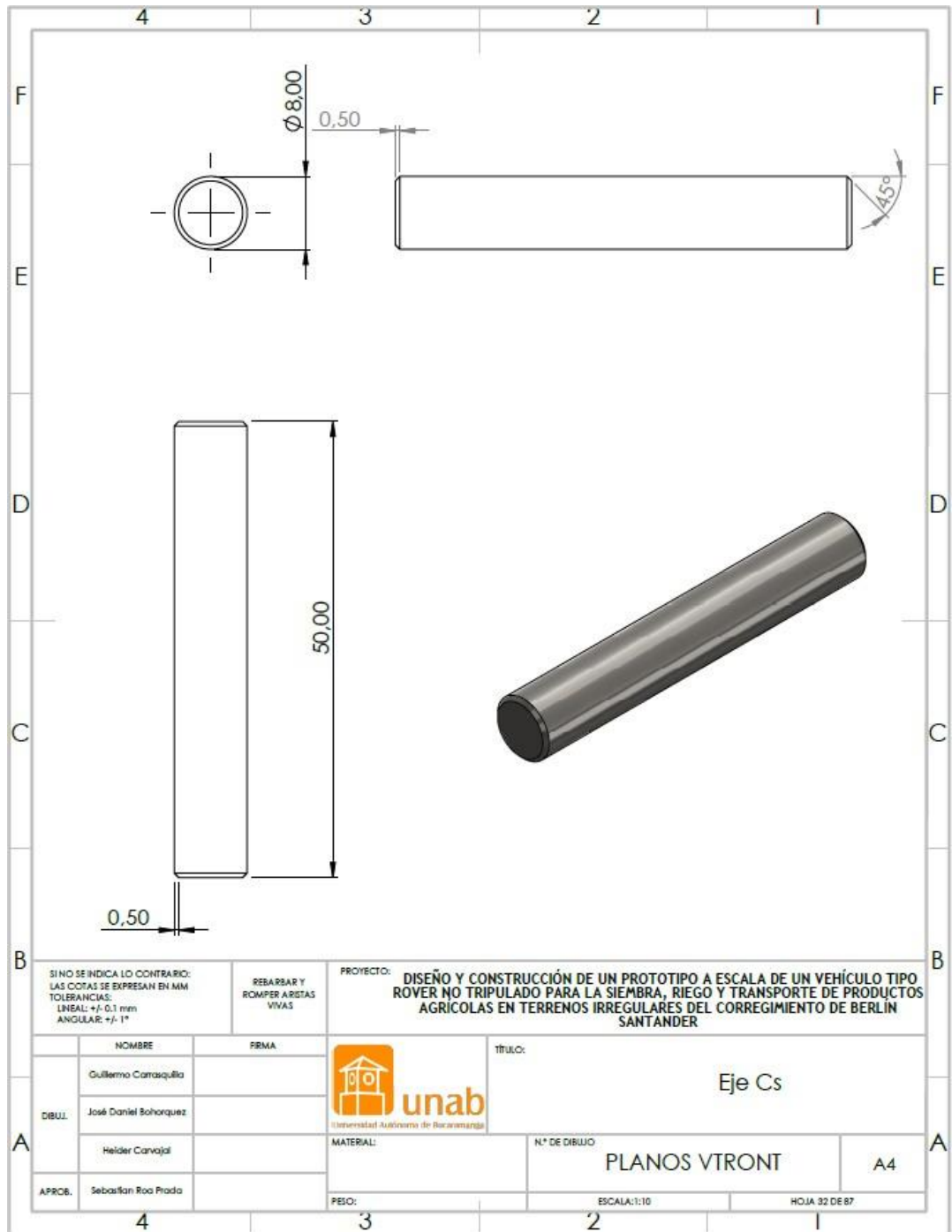


Ilustración 193 Plano del eje de la c.

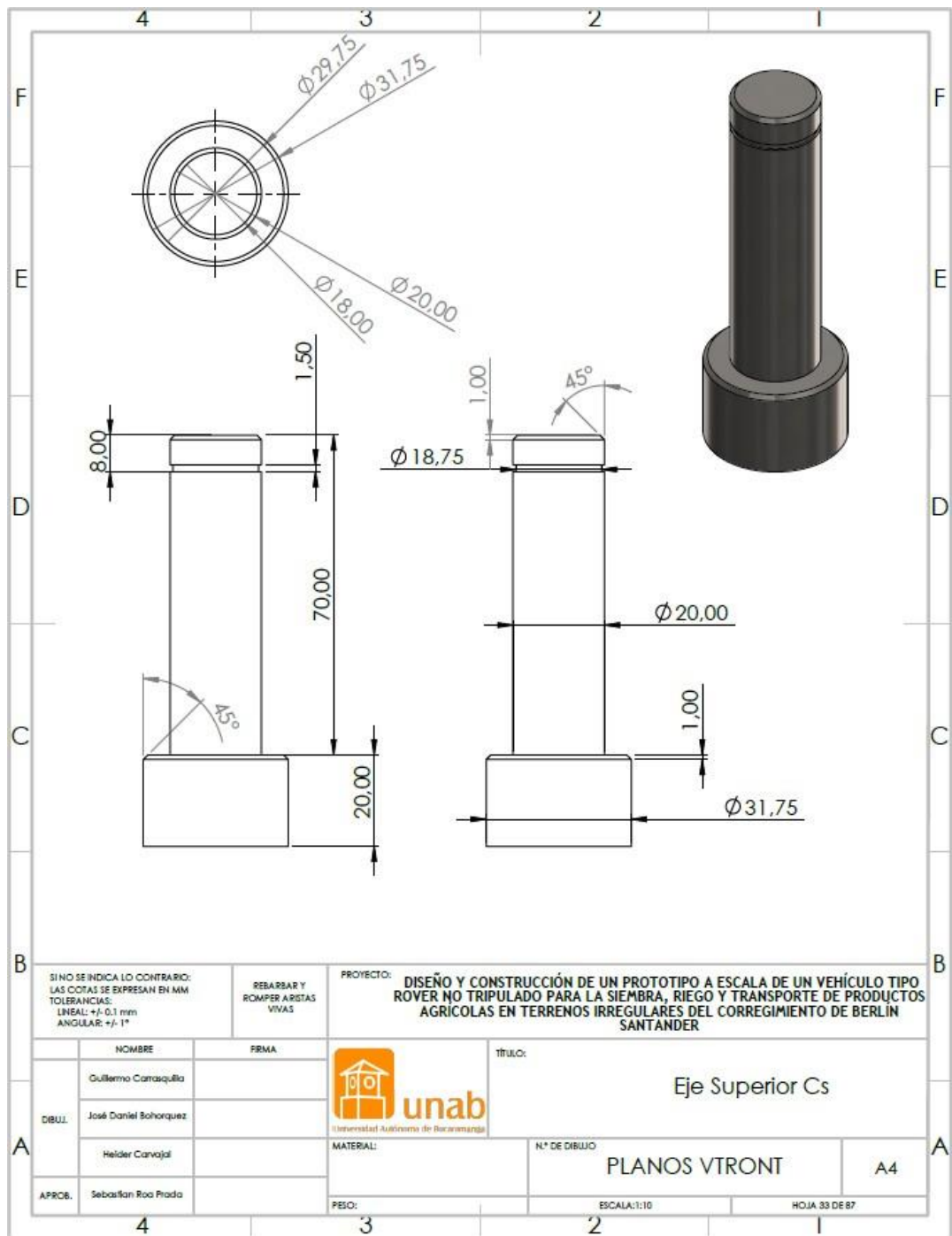


Ilustración 194 Plano del eje superior de la c.

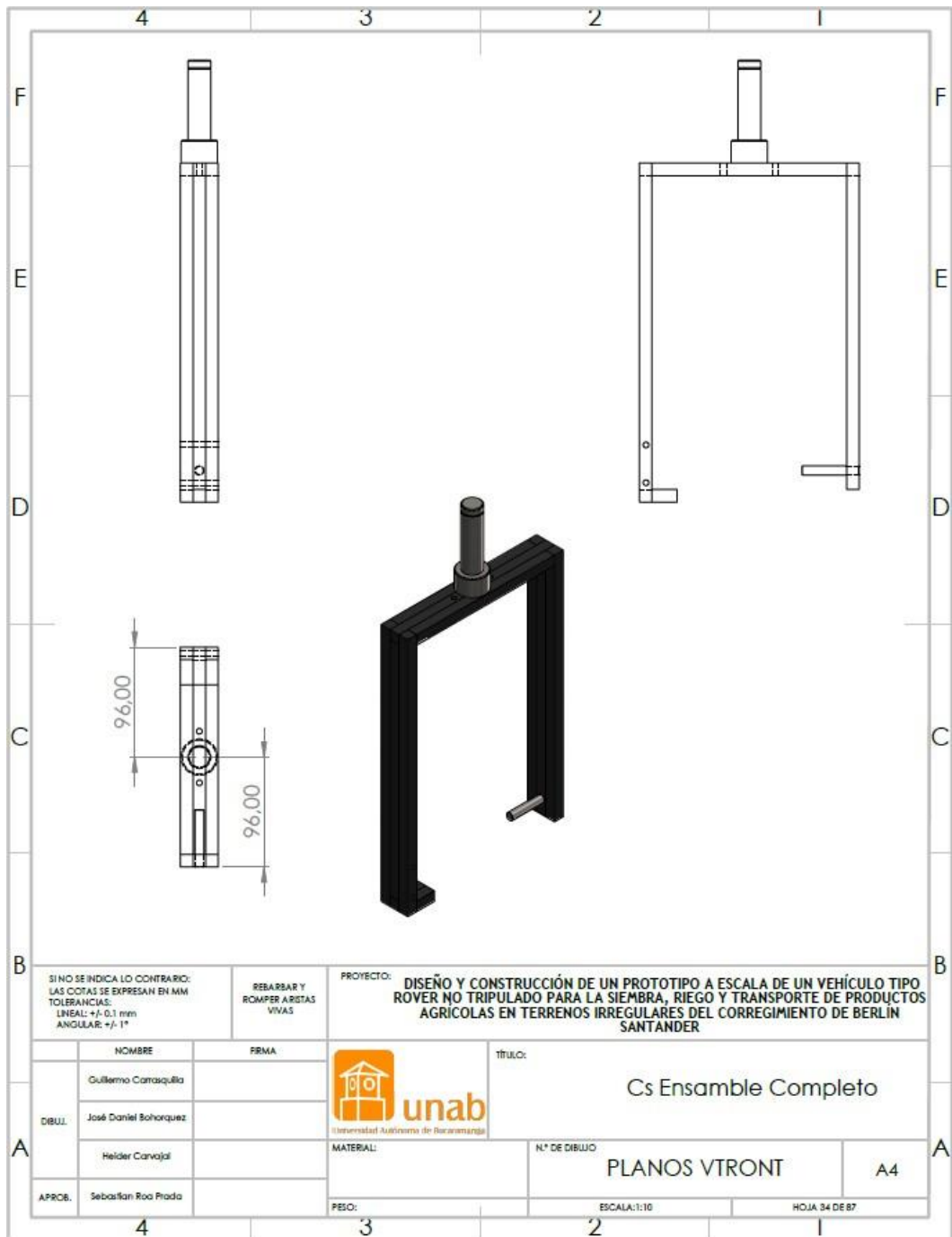


Ilustración 195 Planos de ensamble completo de la c.

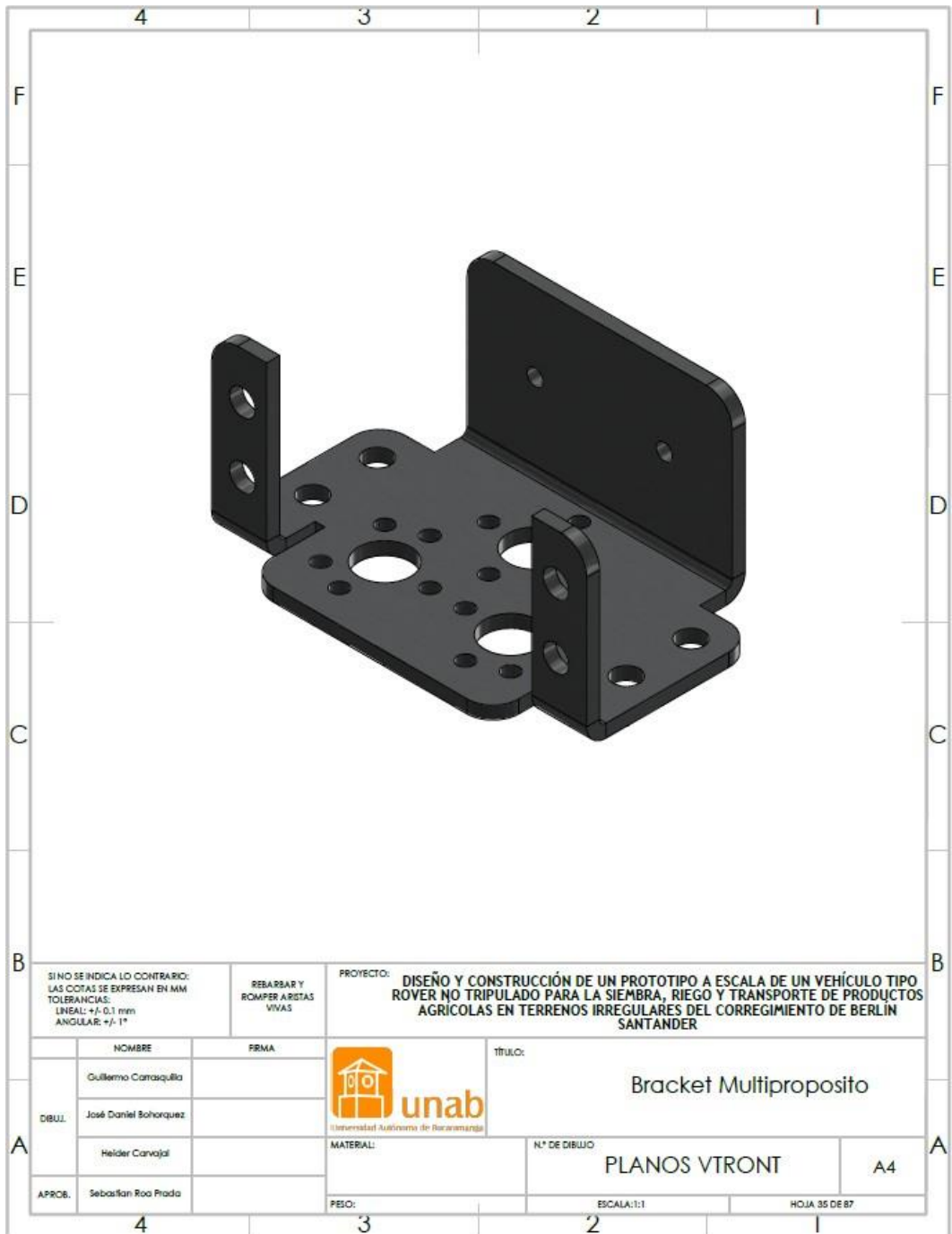


Ilustración 196 Vista isométrica de los brakets de servomotor (pieza estándar).

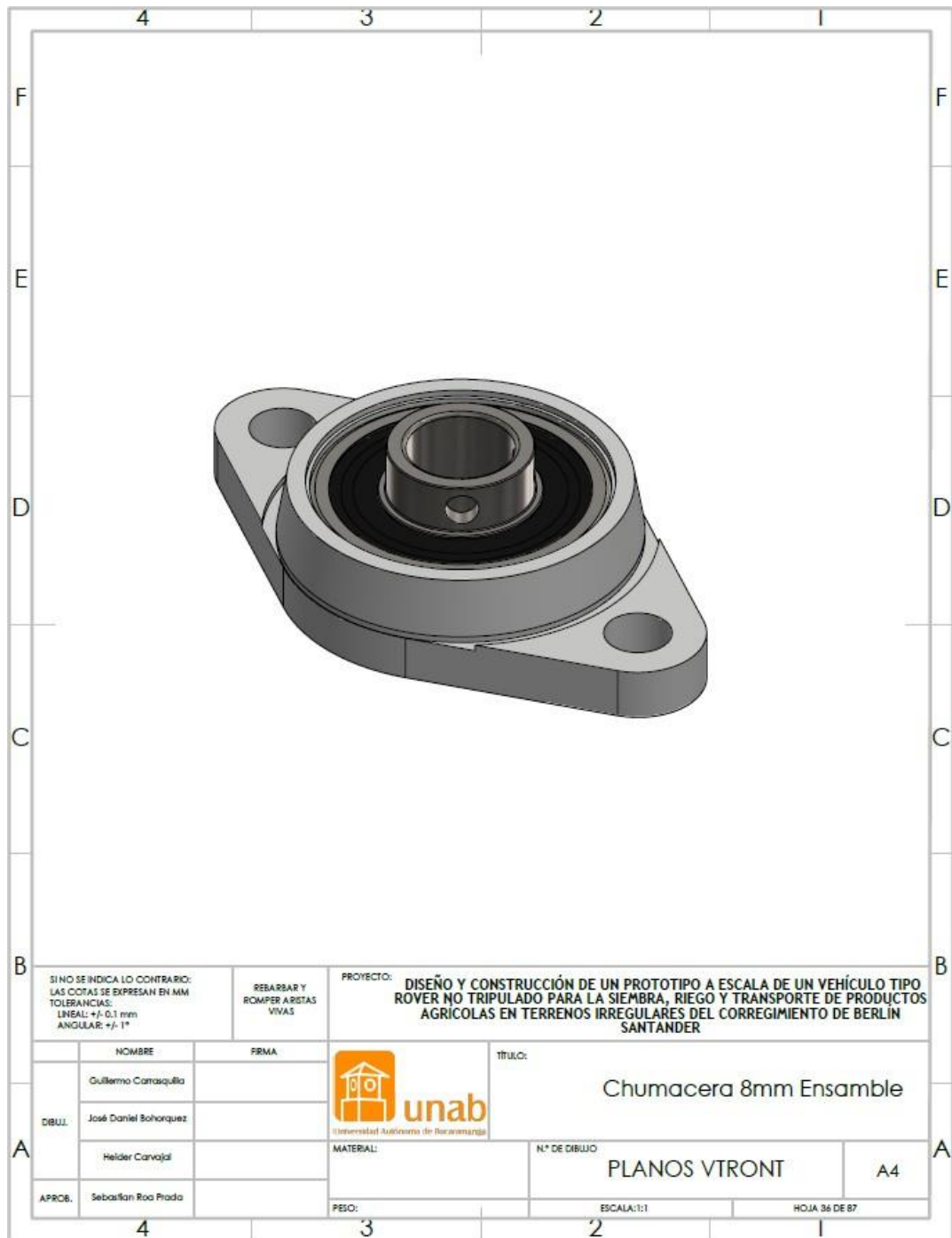


Ilustración 197 Vista isométrica de la chumacera KFL08 (pieza estándar).

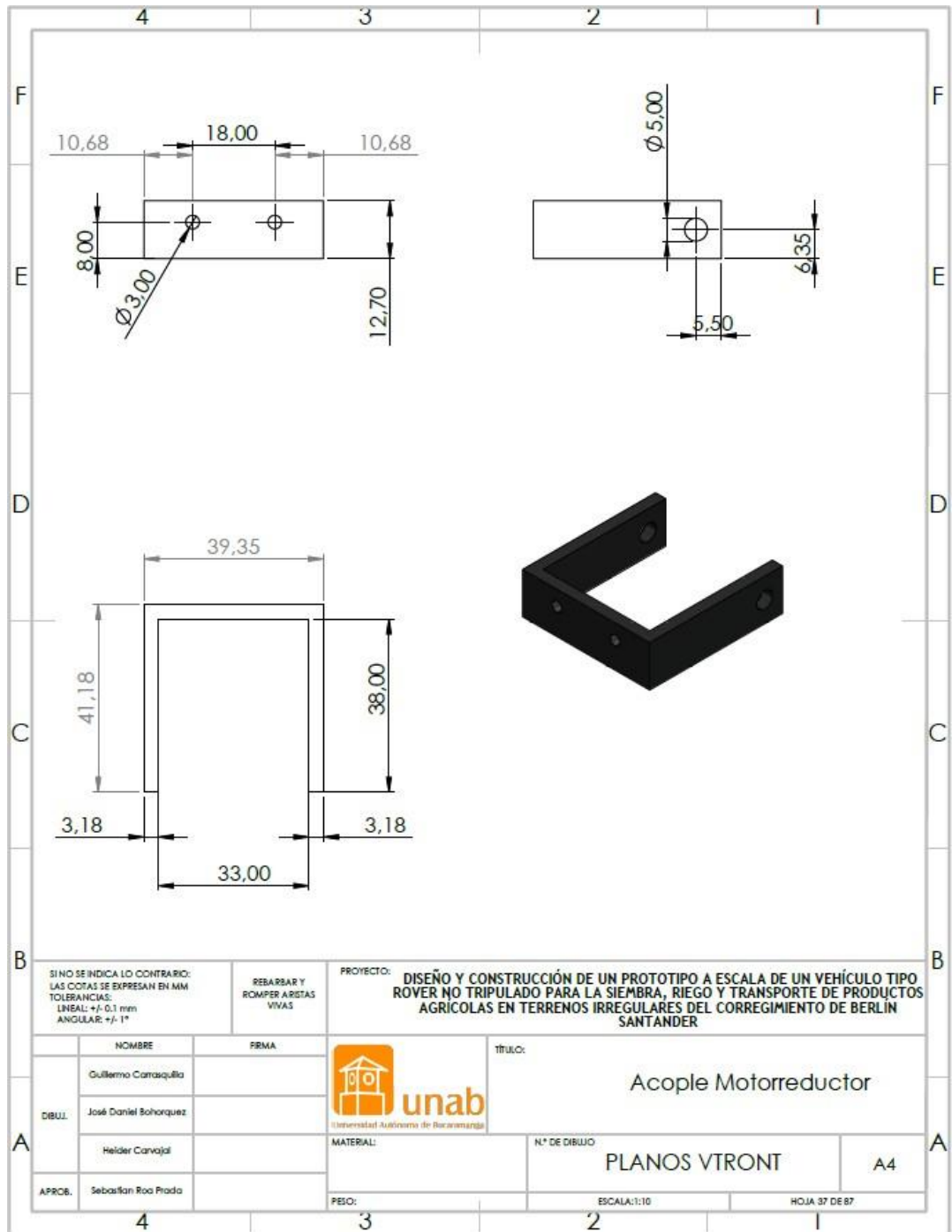


Ilustración 198 Plano de acople del motorreductor para sujeción del mismo.

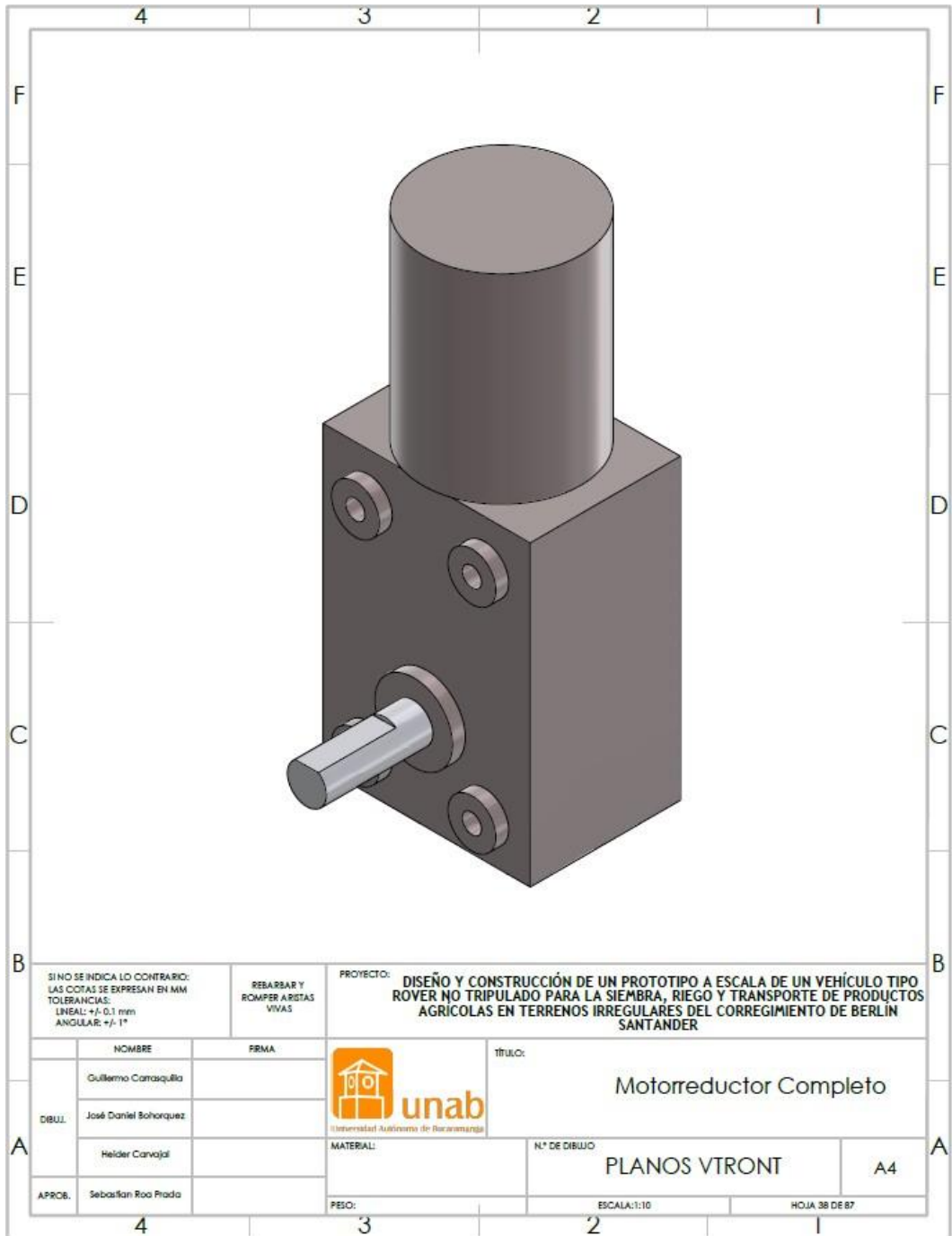


Ilustración 199 Vista isométrica del motorreductor (pieza estándar).

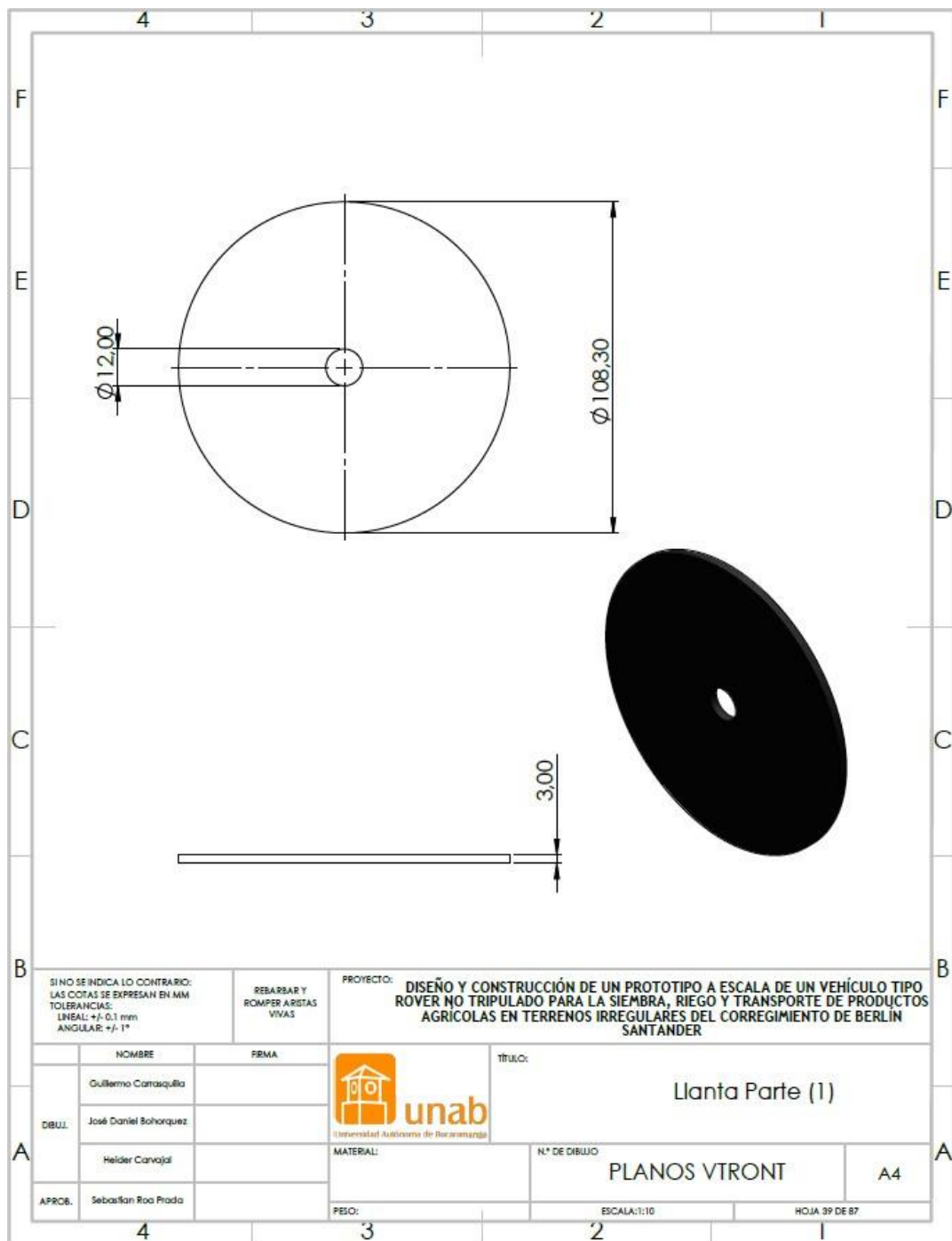


Ilustración 200 Plano de corte de la lámina para la llanta parte 1.

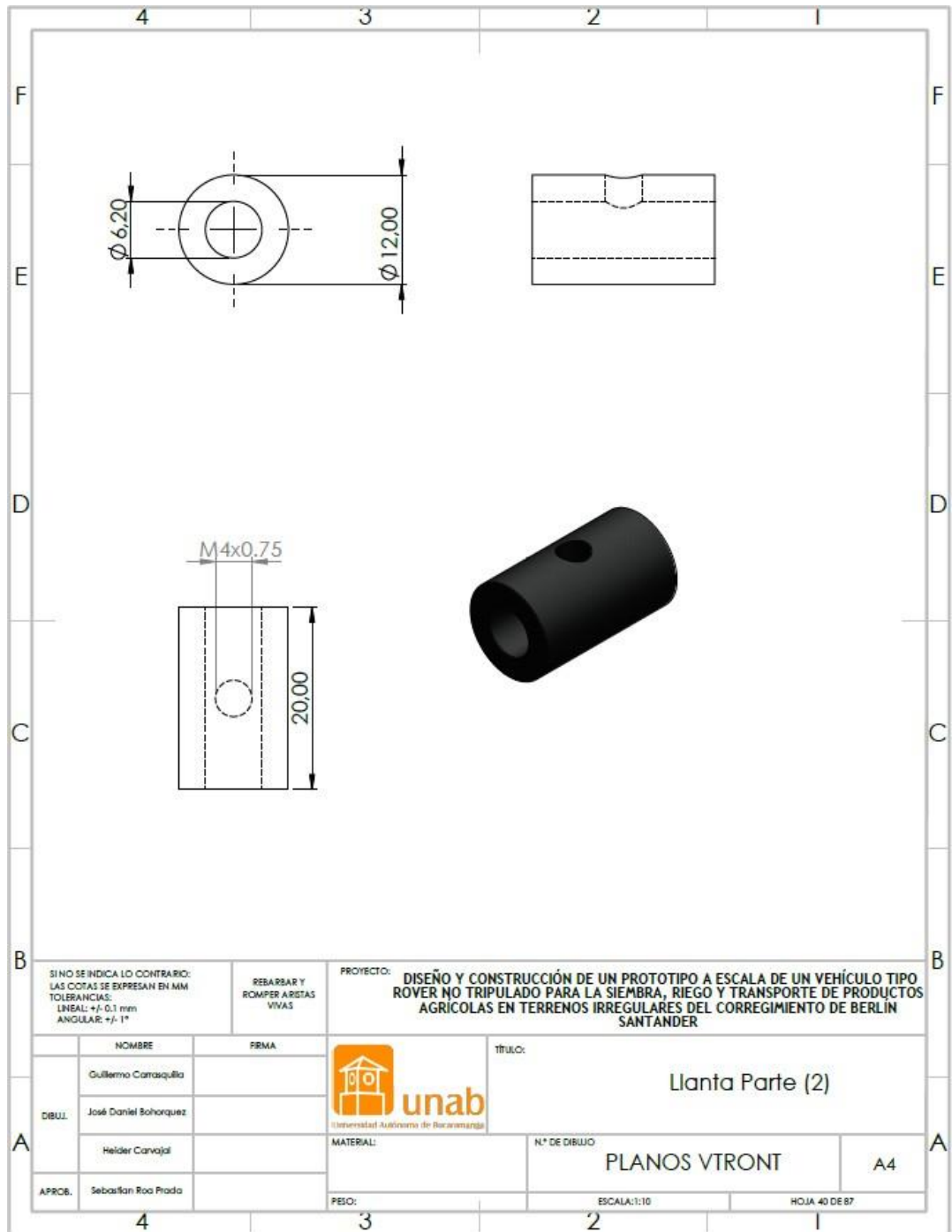


Ilustración 201 Plano de acople entre la llanta y el motorreductor.

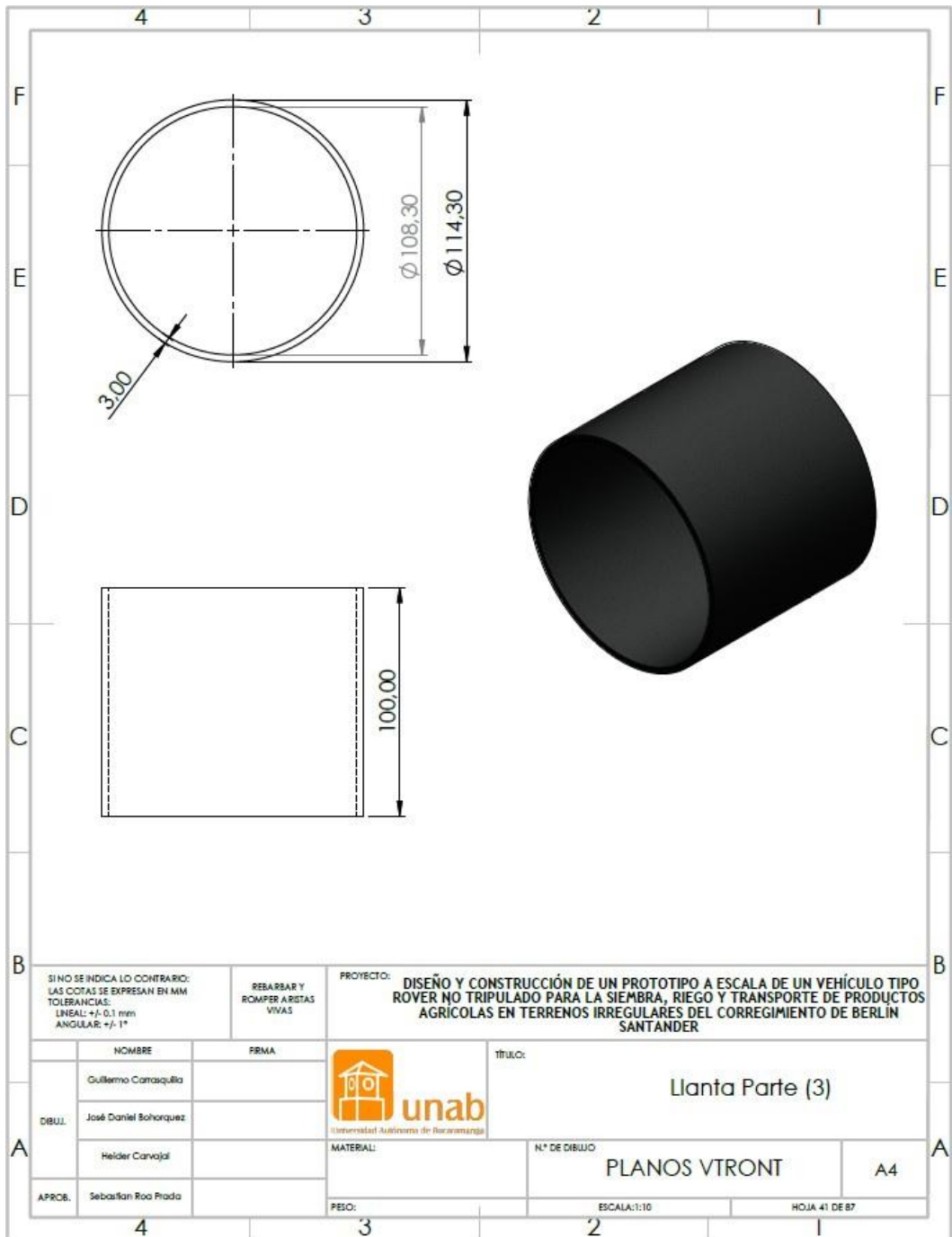


Ilustración 202 Plano de corte de tubería para la llanta parte 3.

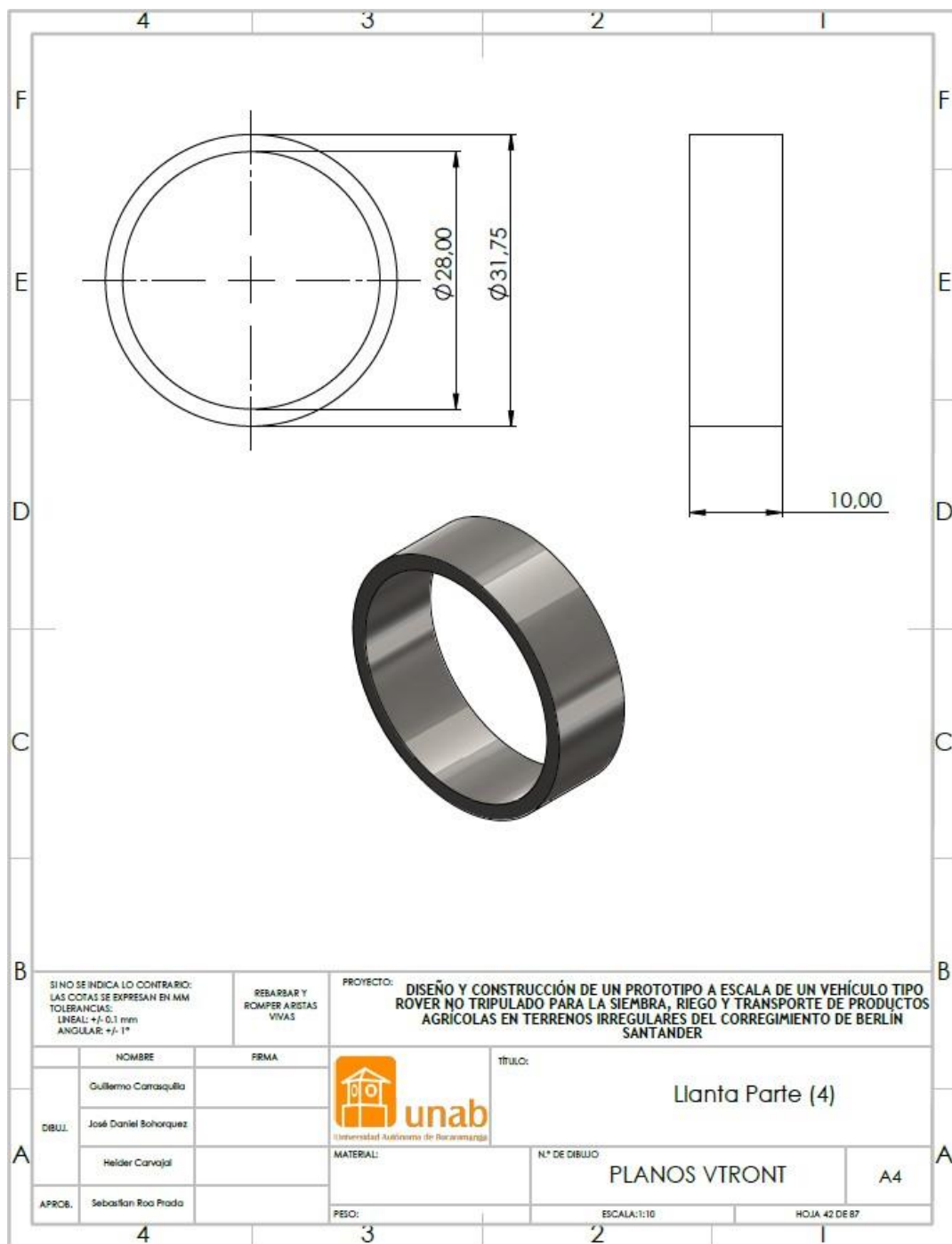


Ilustración 203 Plano de cote de tubería para la llanta parte 4.

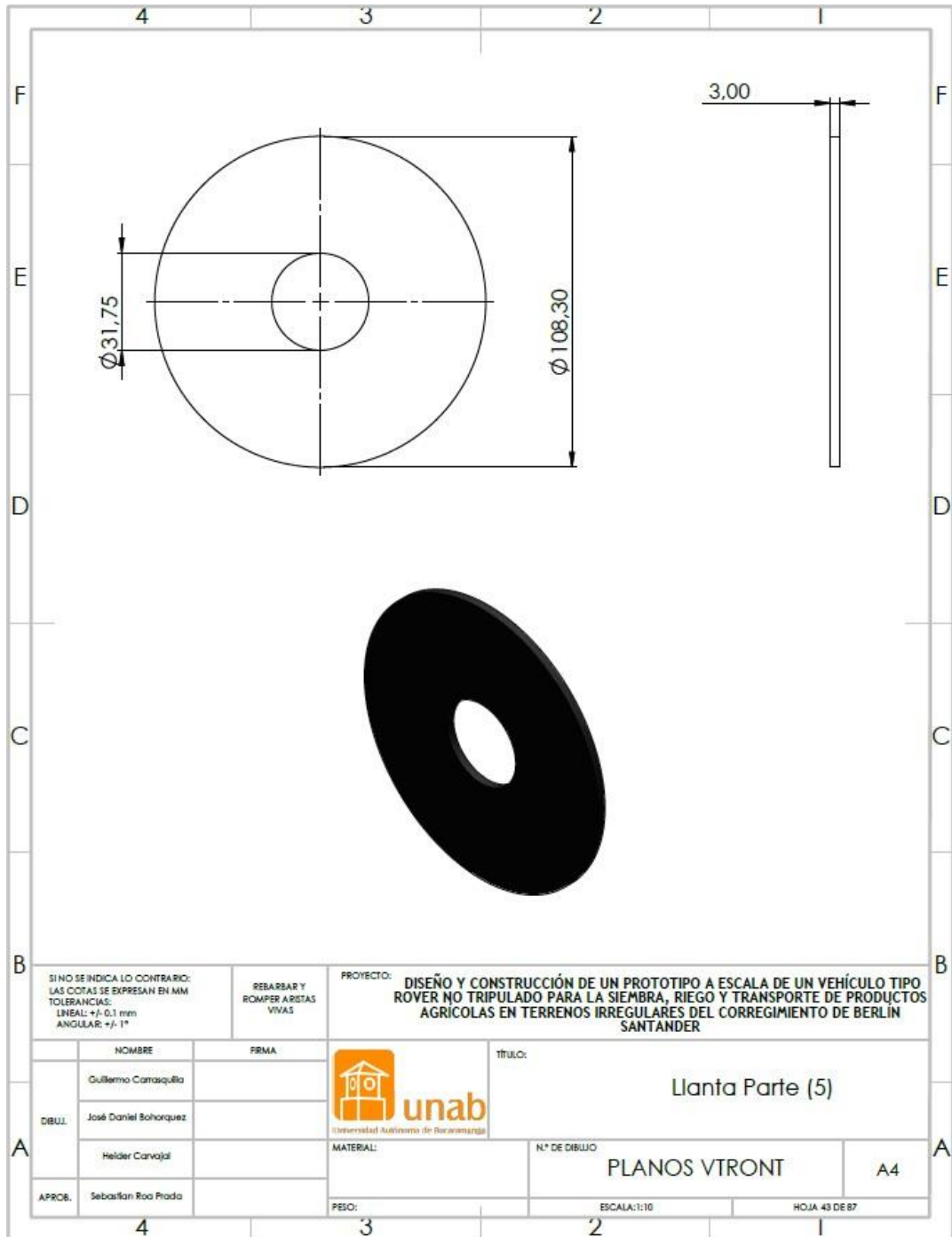


Ilustración 204 Plano de corte de lámina para la llanta parte 5.

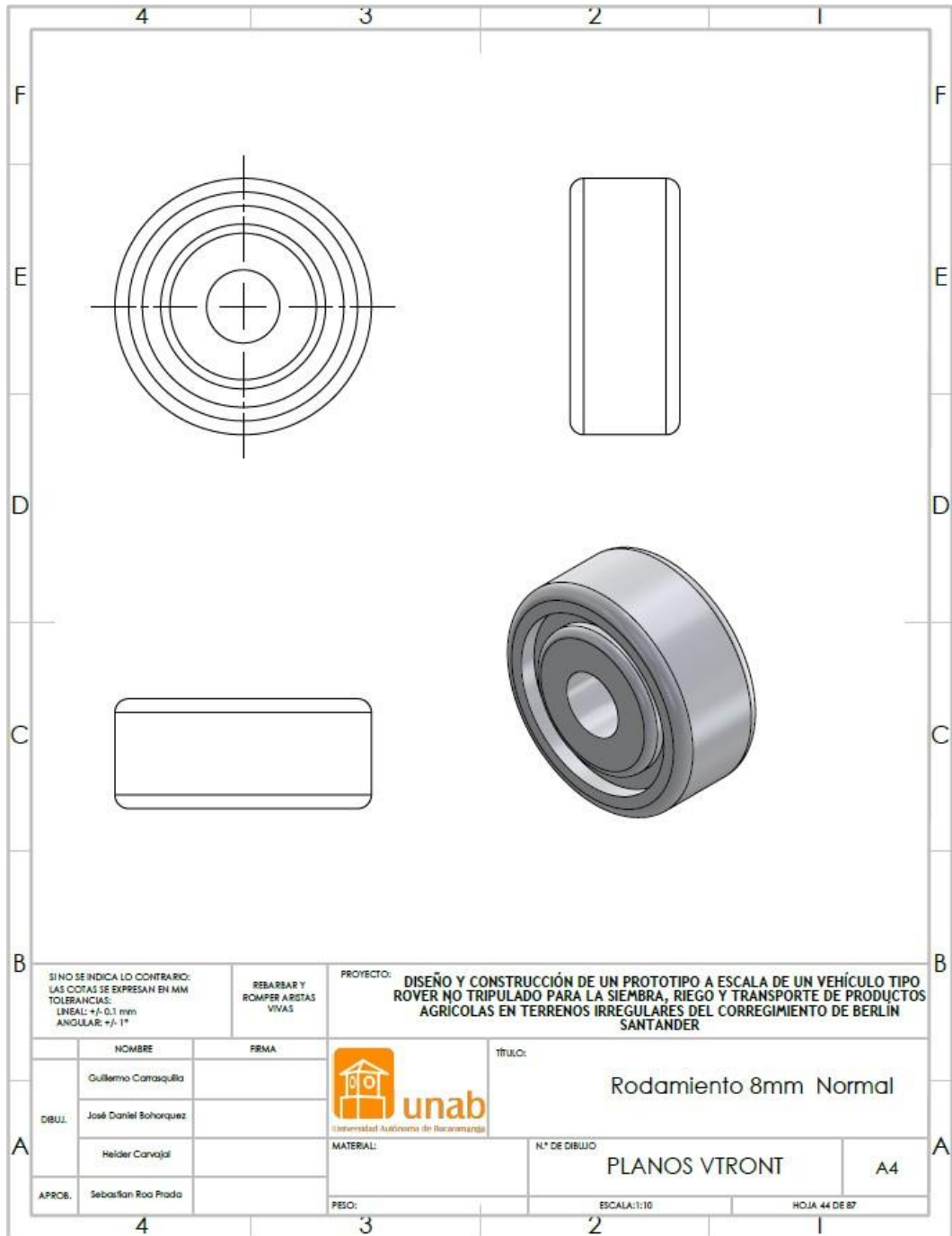


Ilustración 205 Vista isométrica rodamiento de bola de 8milímetros (pieza estándar).

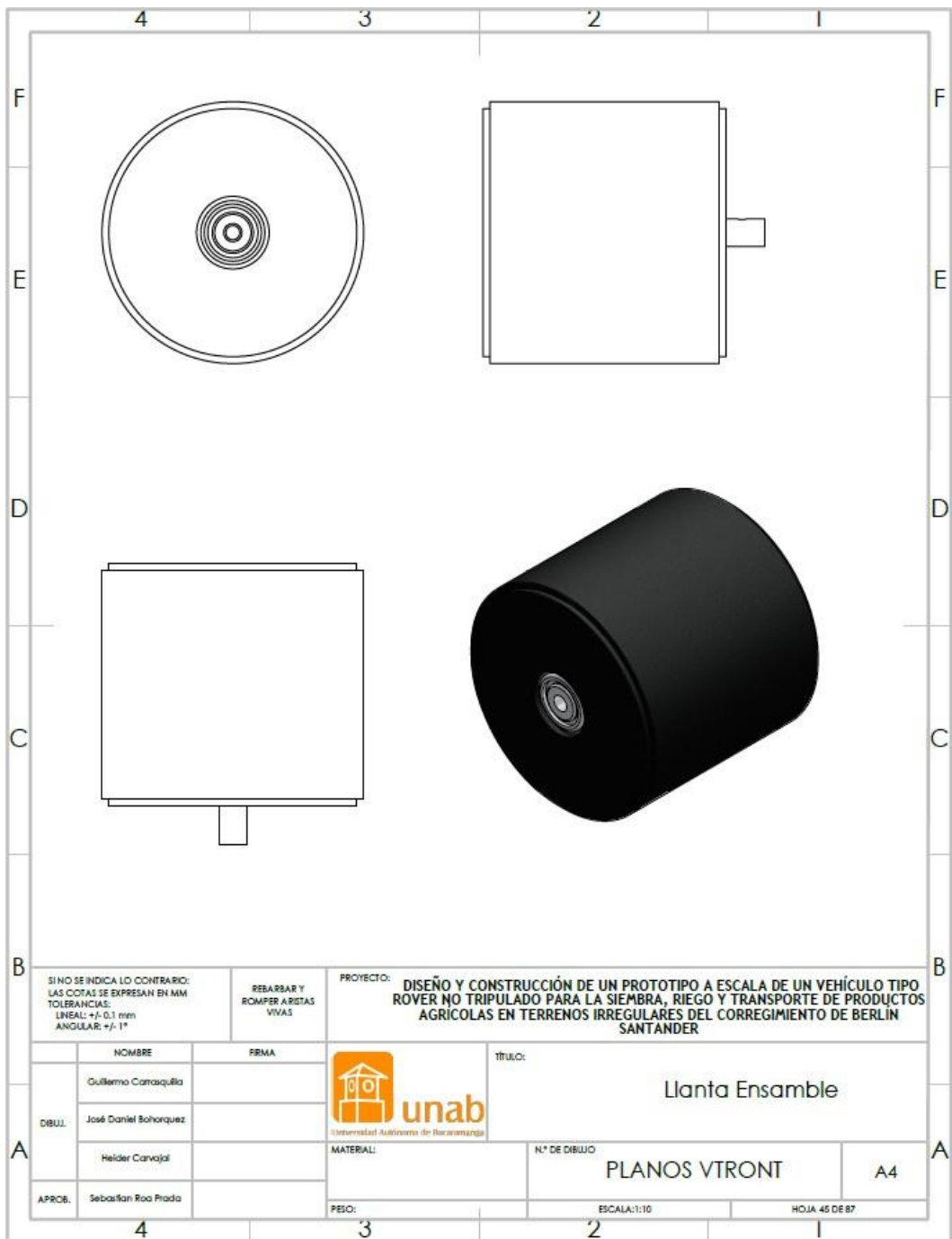


Ilustración 206 Ensamble de la llanta.

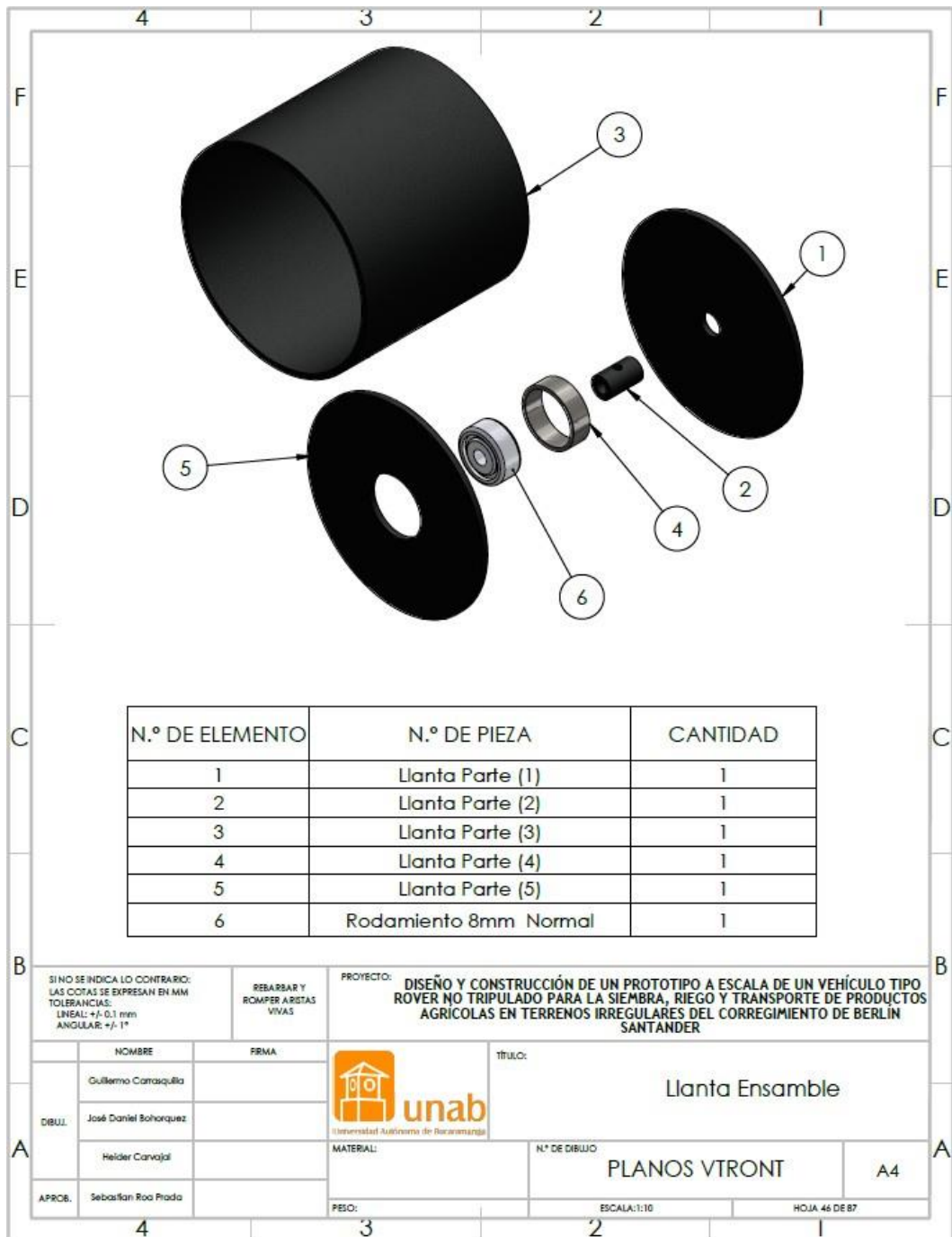


Ilustración 207 Partes y cantidades de piezas de la llanta.

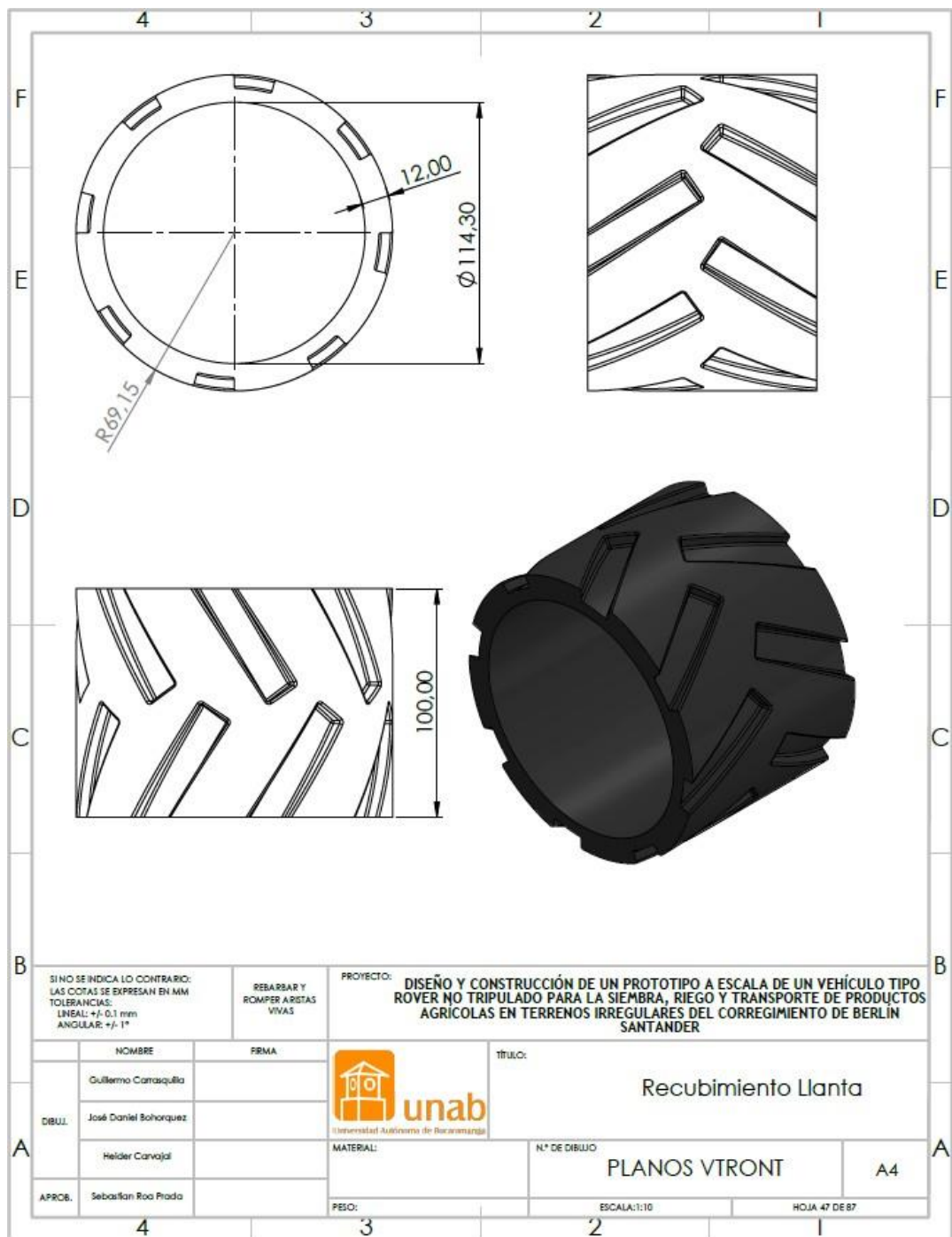


Ilustración 208 Plano de caucho externo de la llanta.

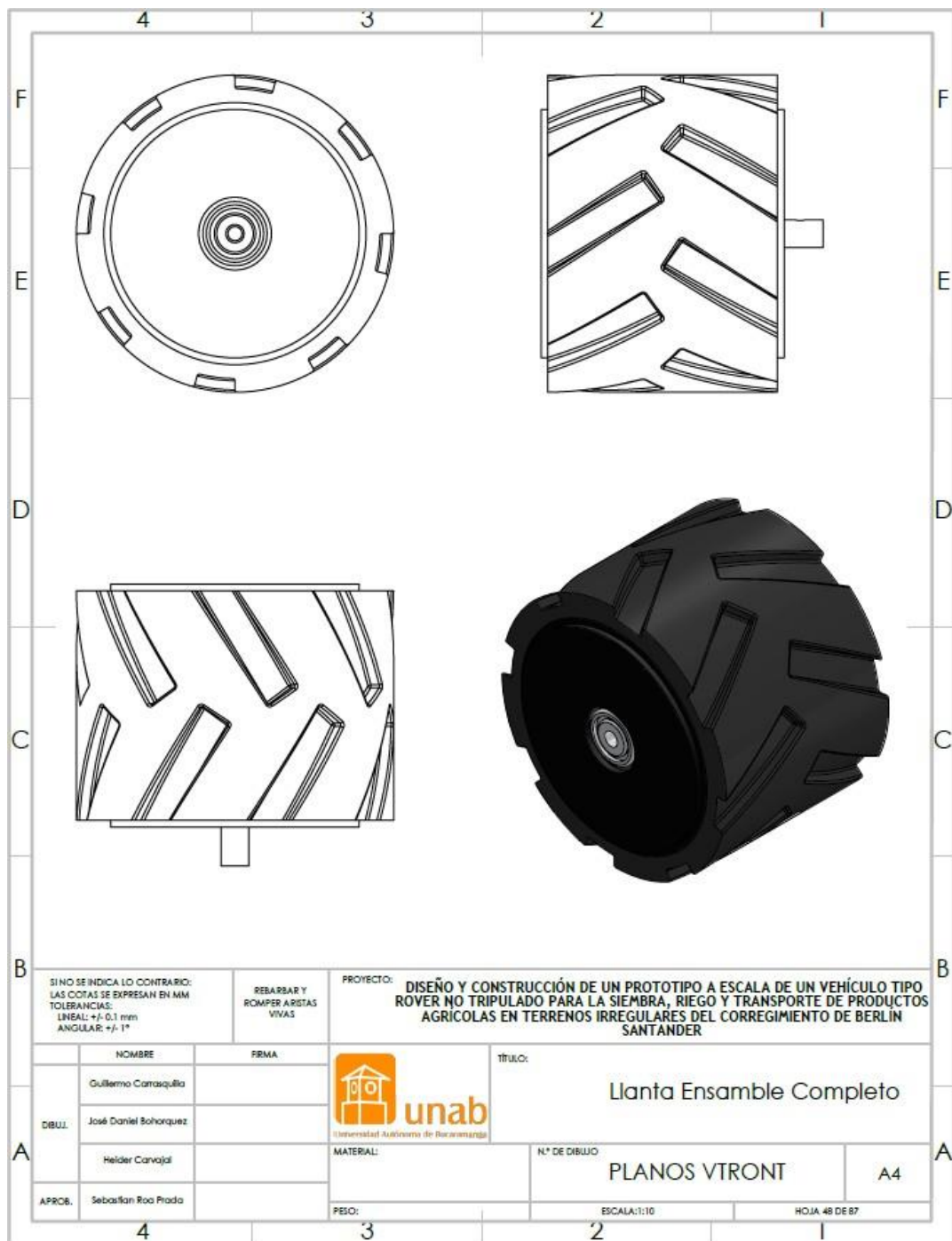


Ilustración 209 Ensamble de la llanta completo.

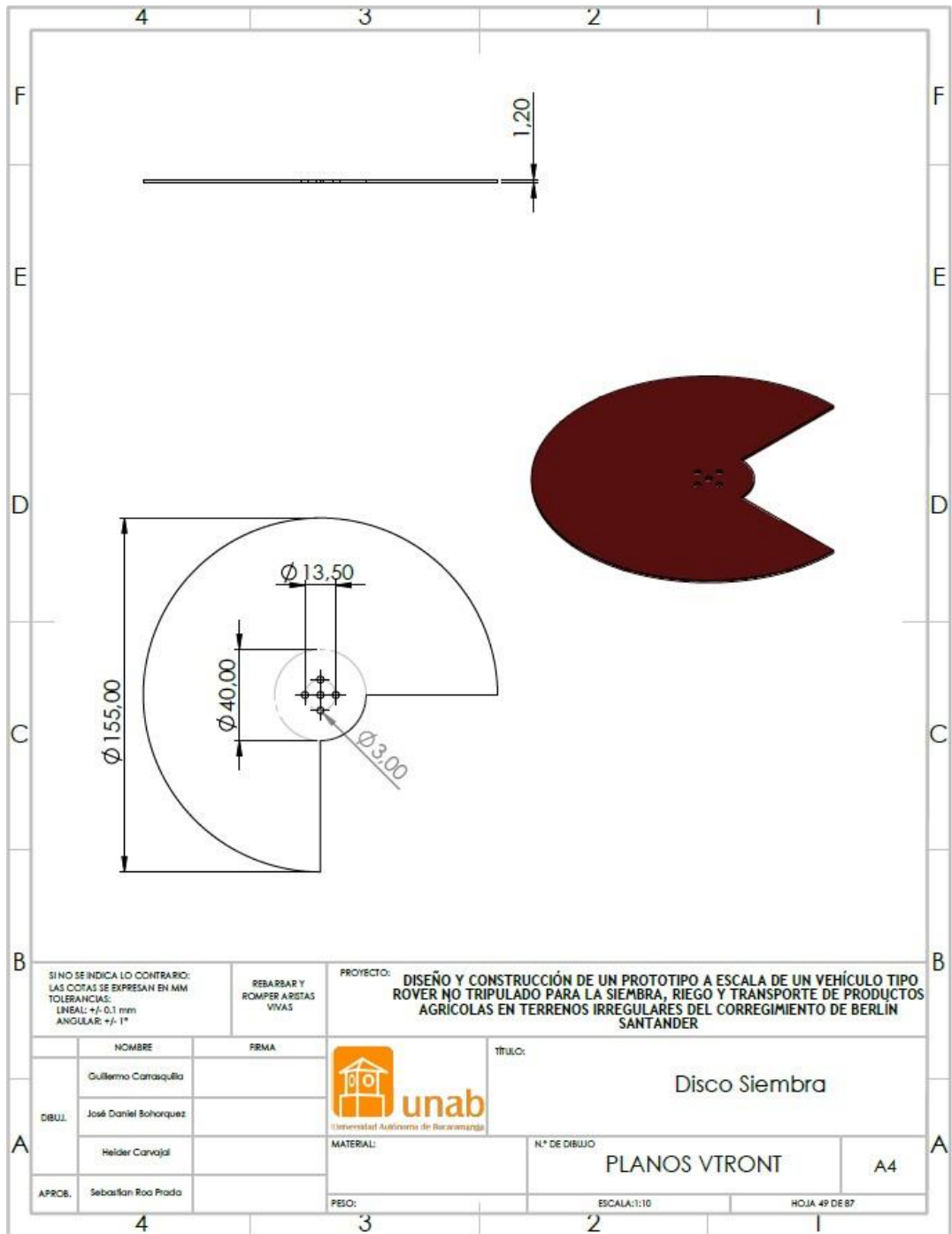


Ilustración 210 Plano disco de siembra.

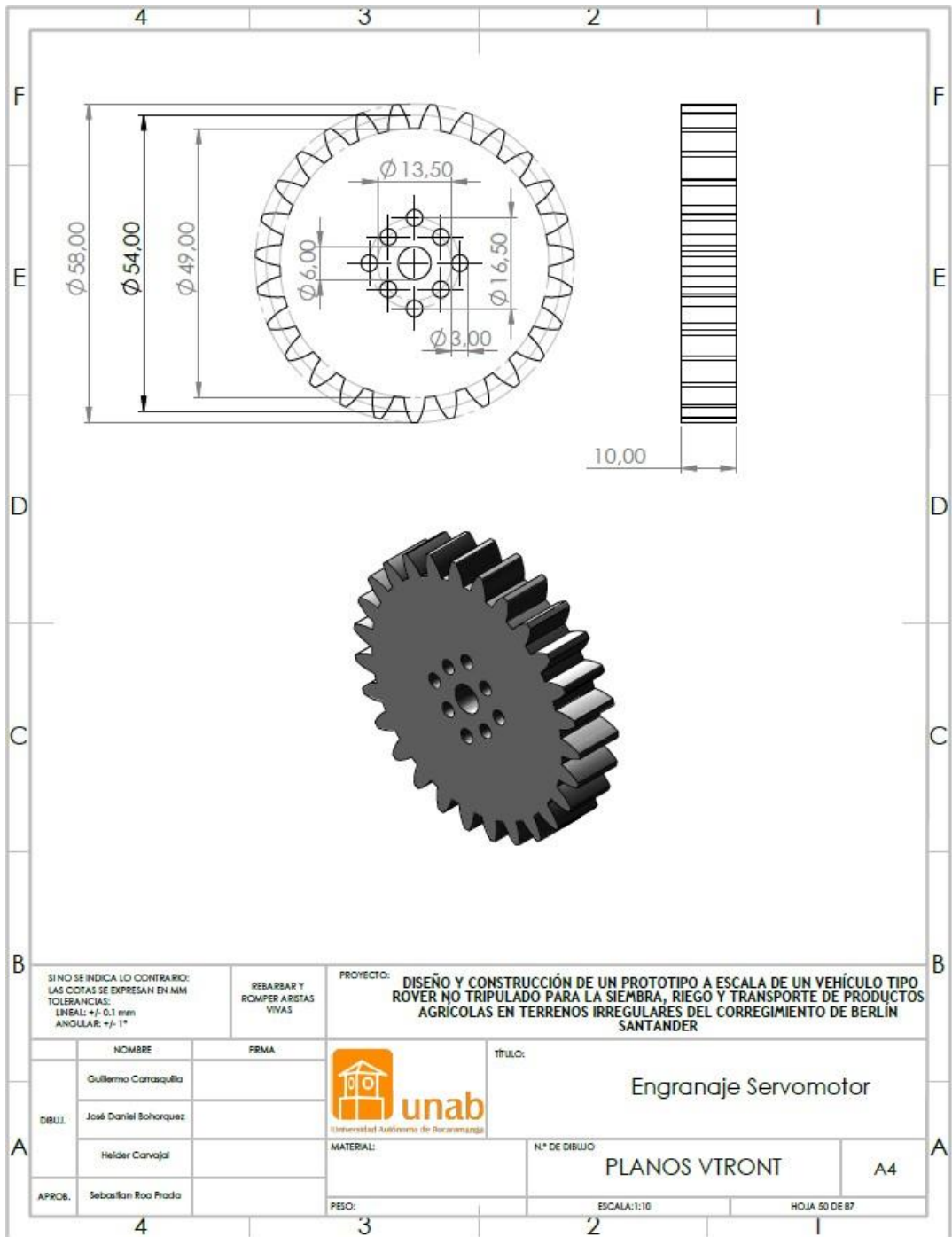


Ilustración 211 Plano de engranaje de servomotor.

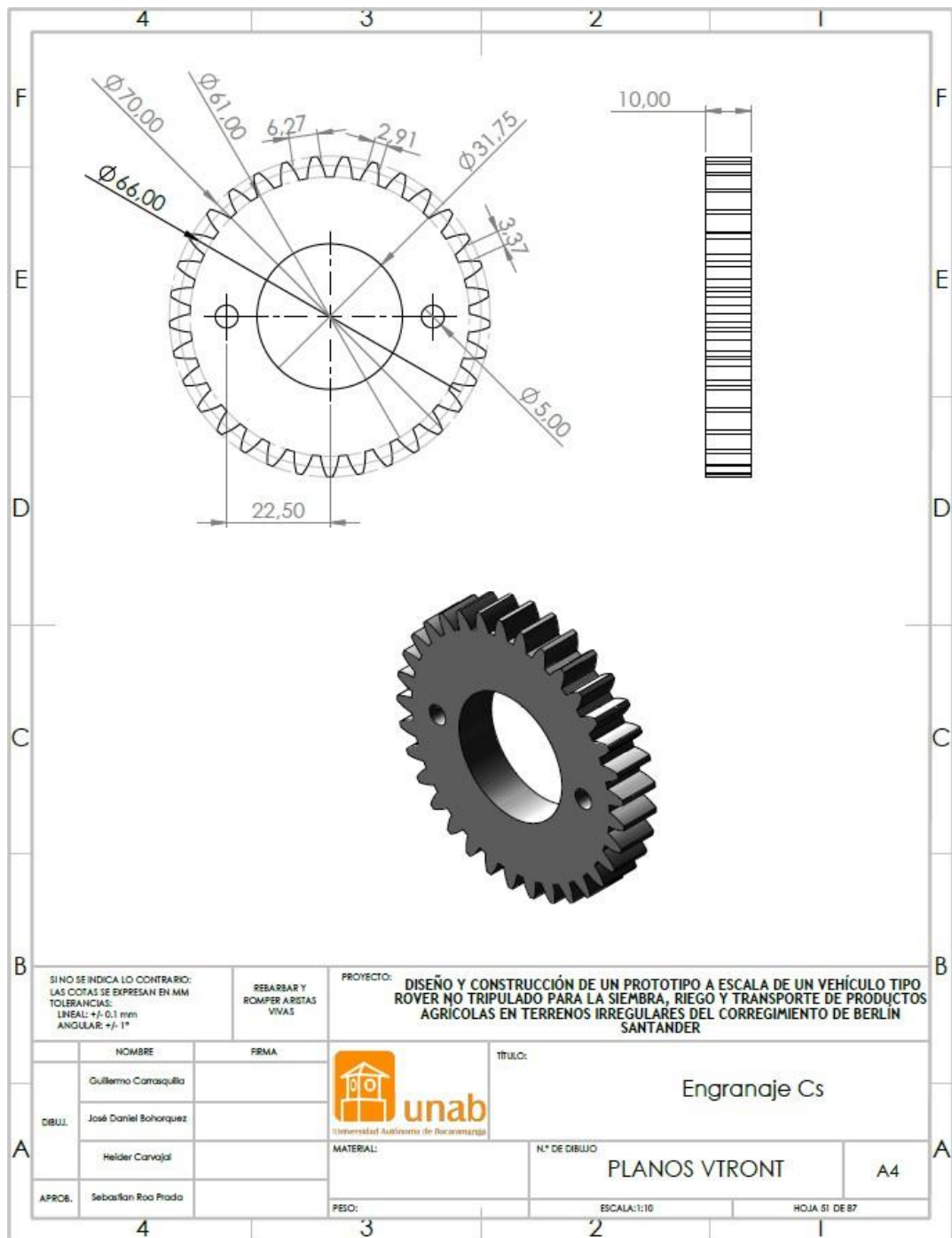


Ilustración 212 Plano de engranaje de la c.

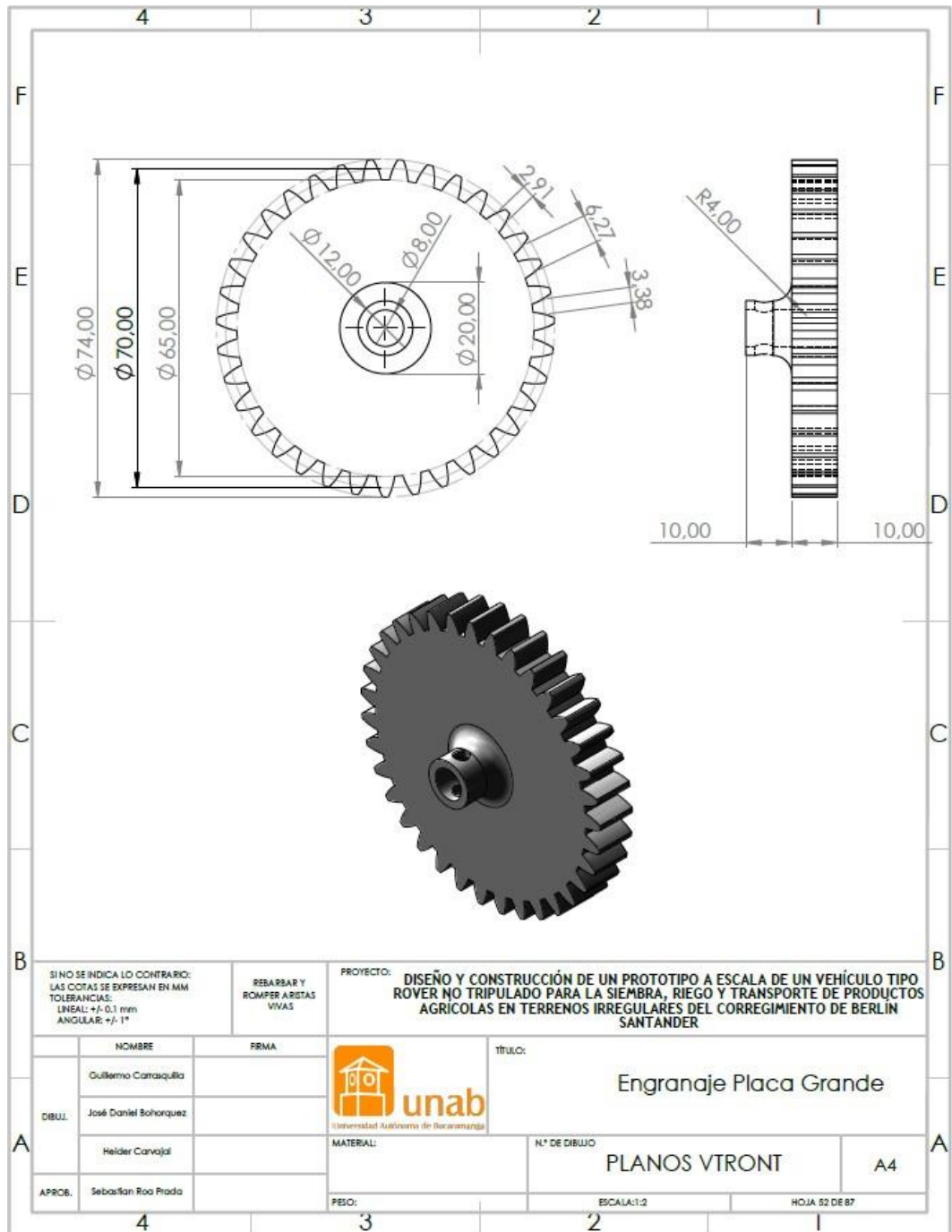


Ilustración 213 Plano de engranaje de la placa.

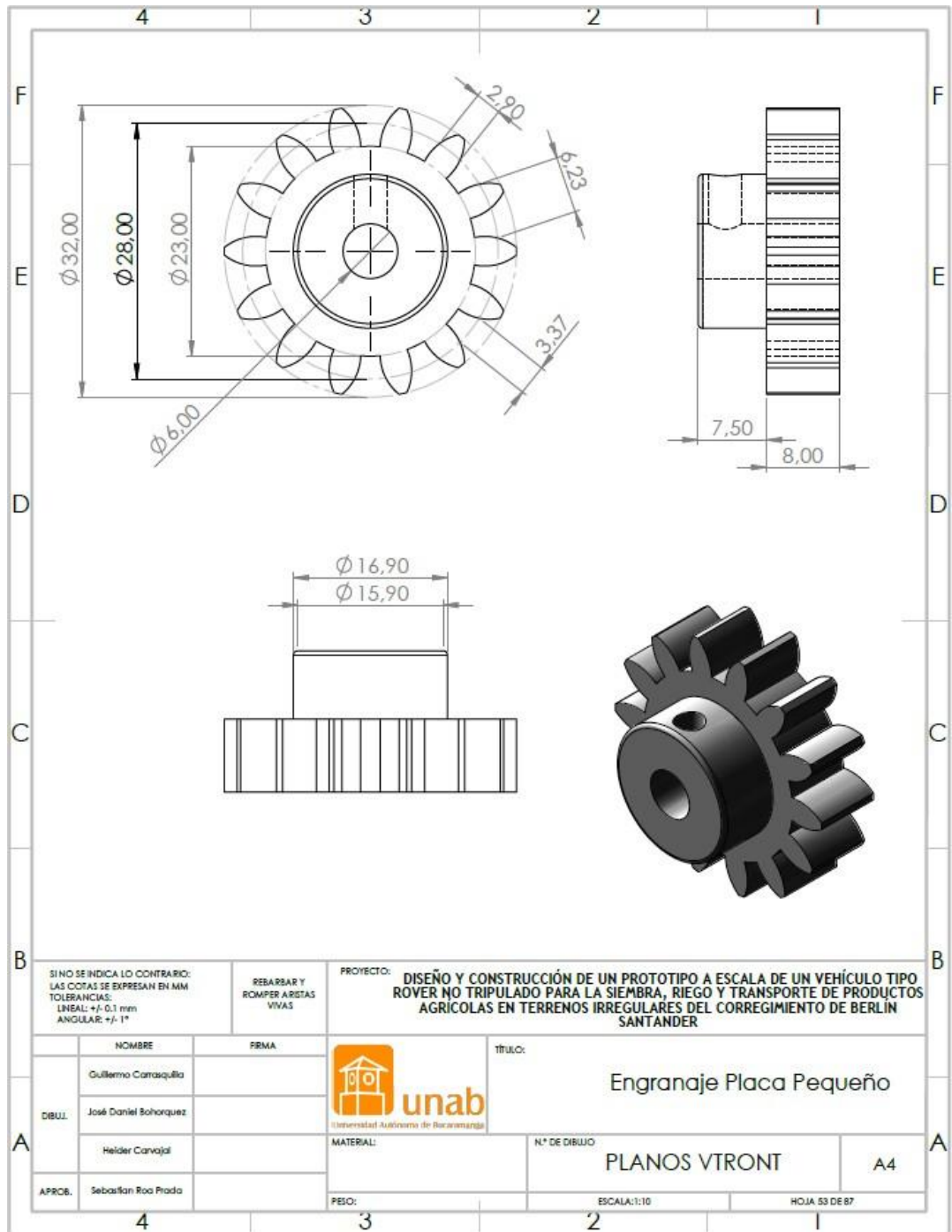


Ilustración 214 Plano de engranaje del motorreductor de la placa.

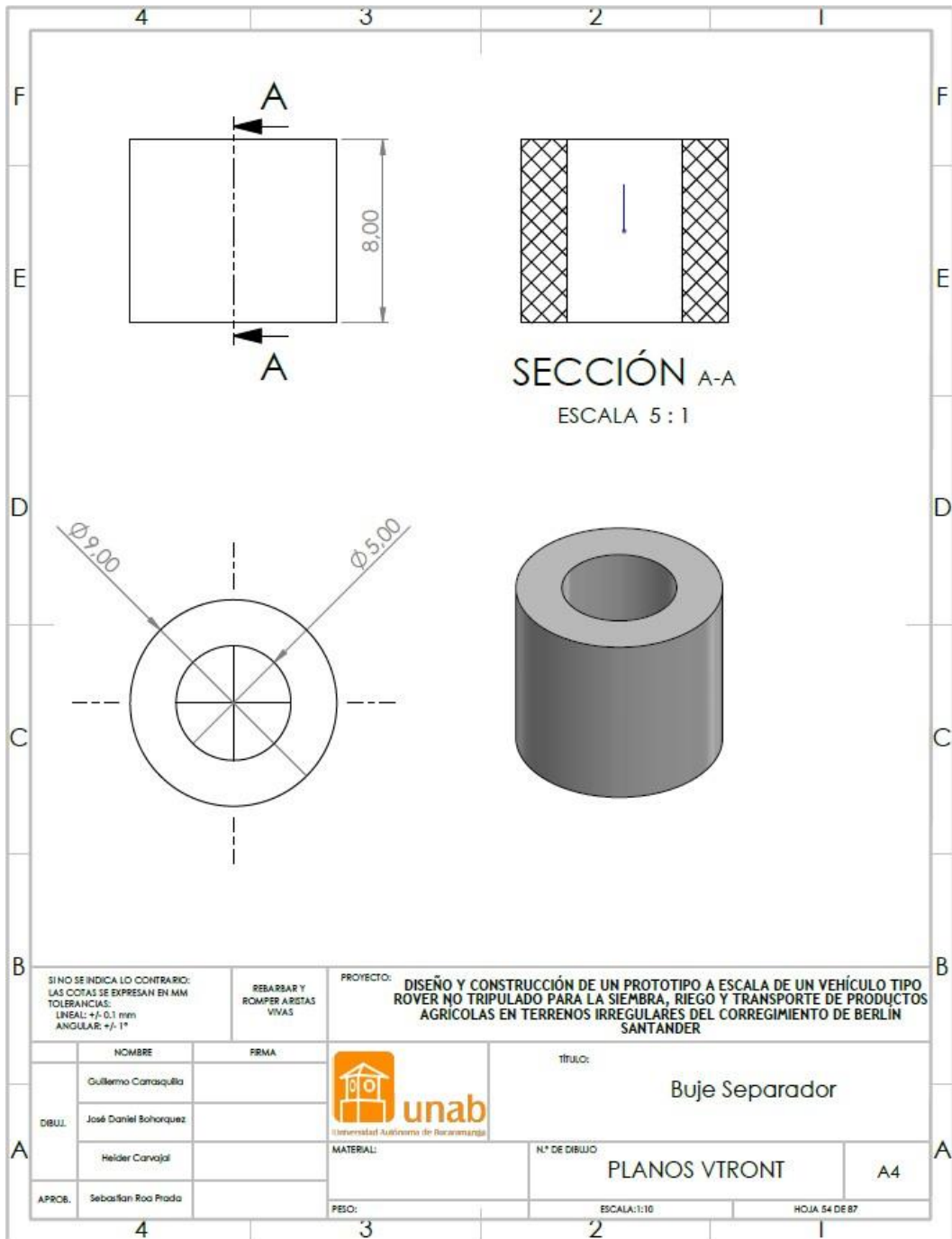


Ilustración 215 Plano de buje separador de los engranajes de la c.

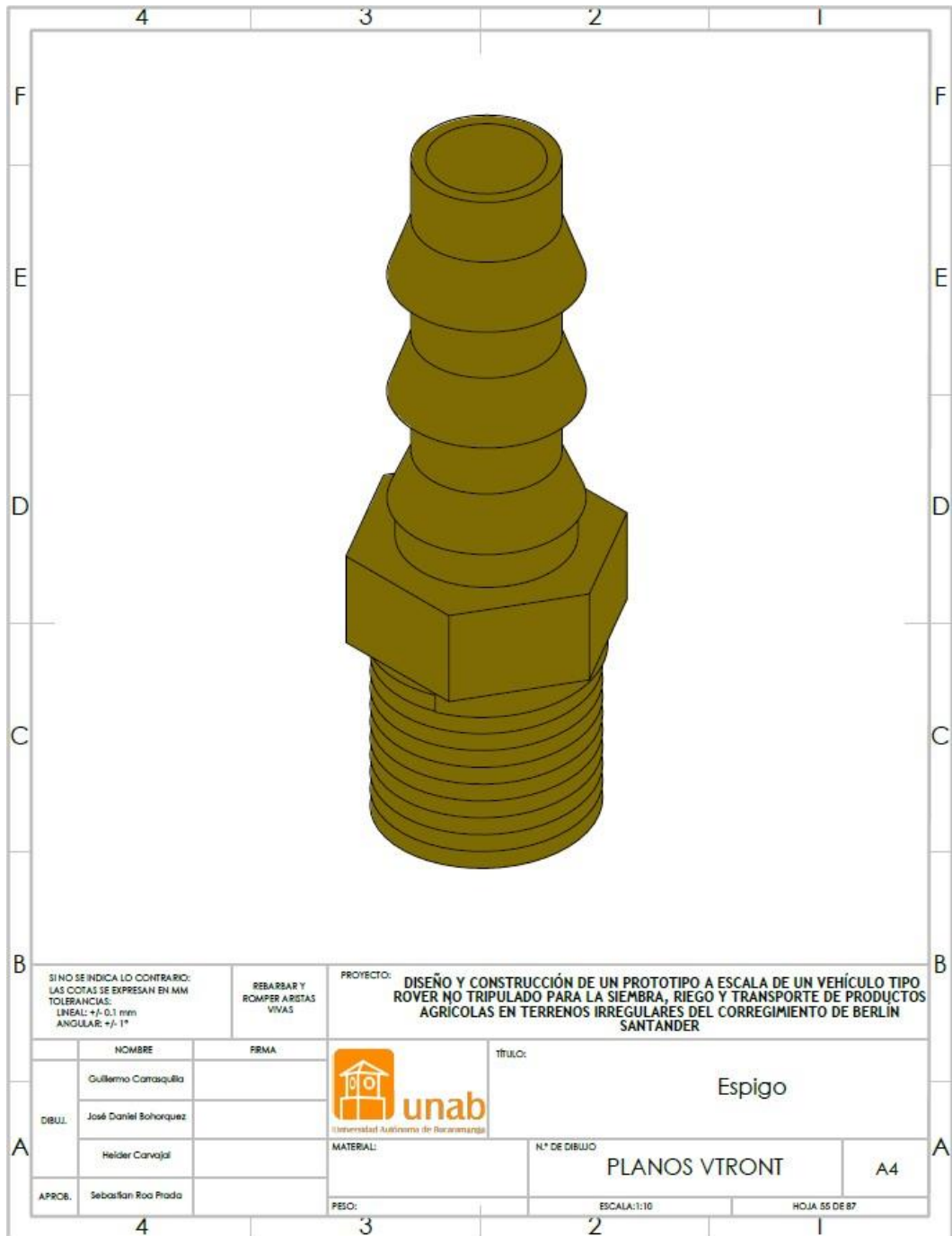


Ilustración 216 Vista isométrica del espigo (pieza estándar).

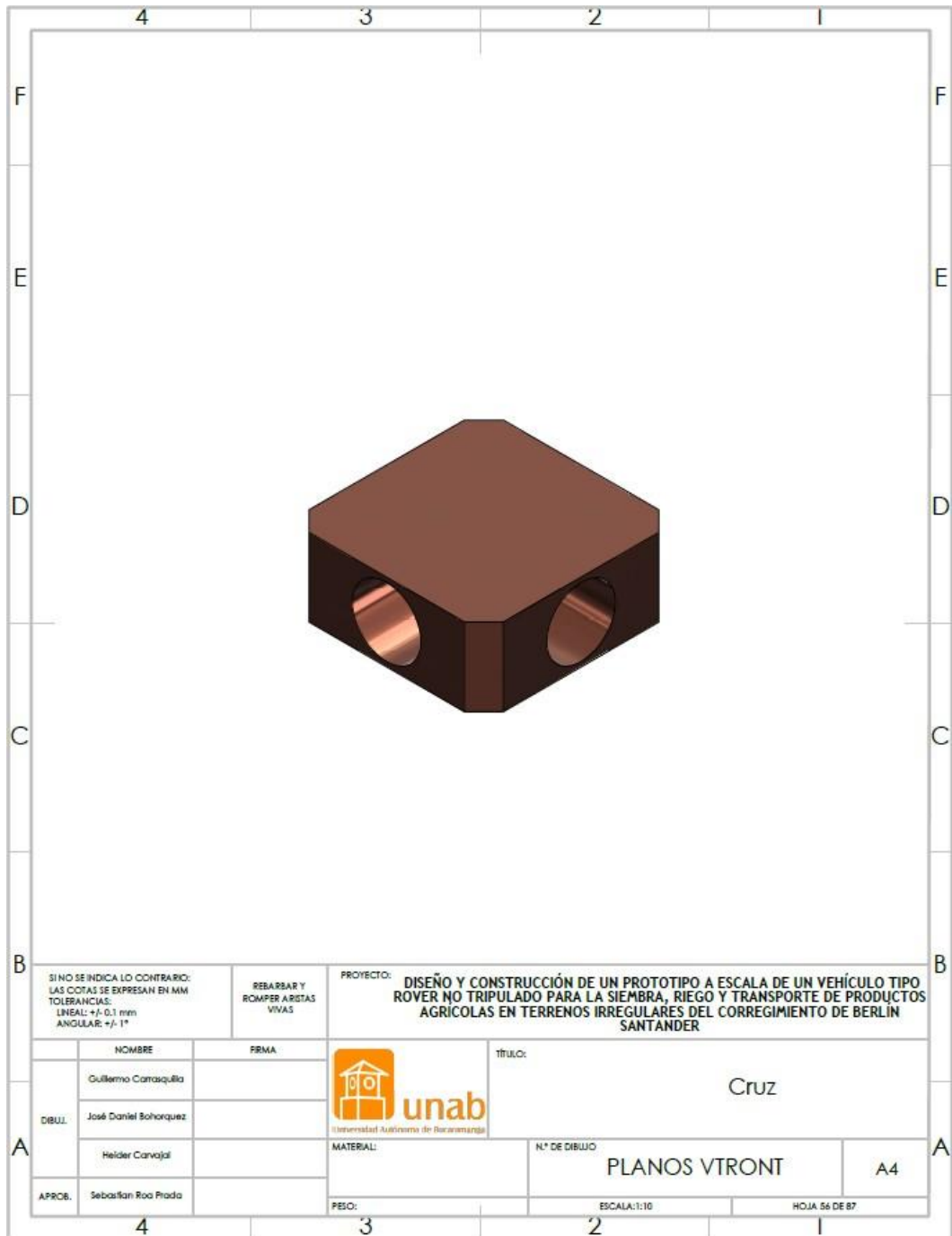


Ilustración 217 Vista isométrica de la cruz (pieza estándar).

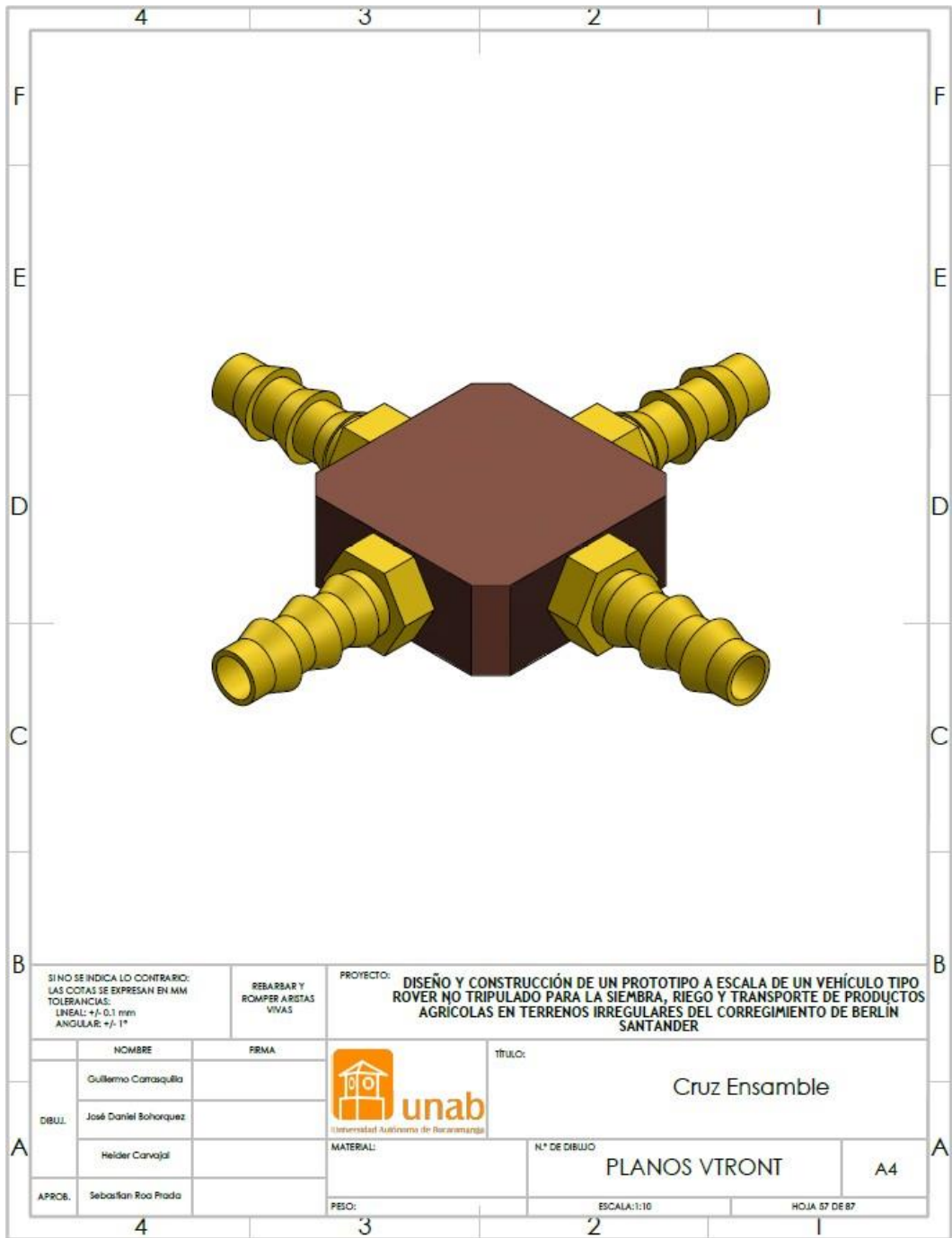


Ilustración 218 Ensamble de la cruz con el espigo.

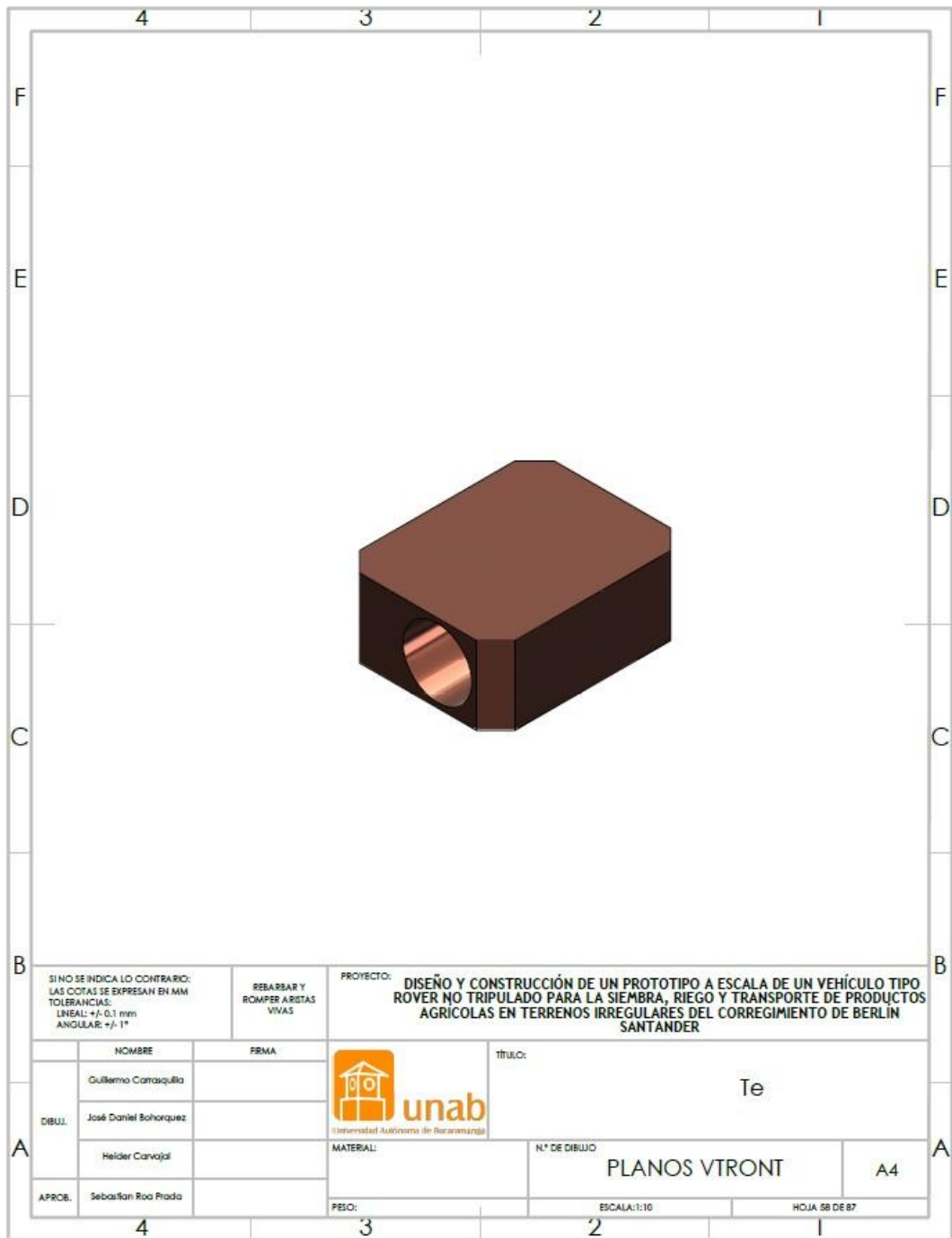


Ilustración 219 Vista isométrica de la te (pieza estándar).

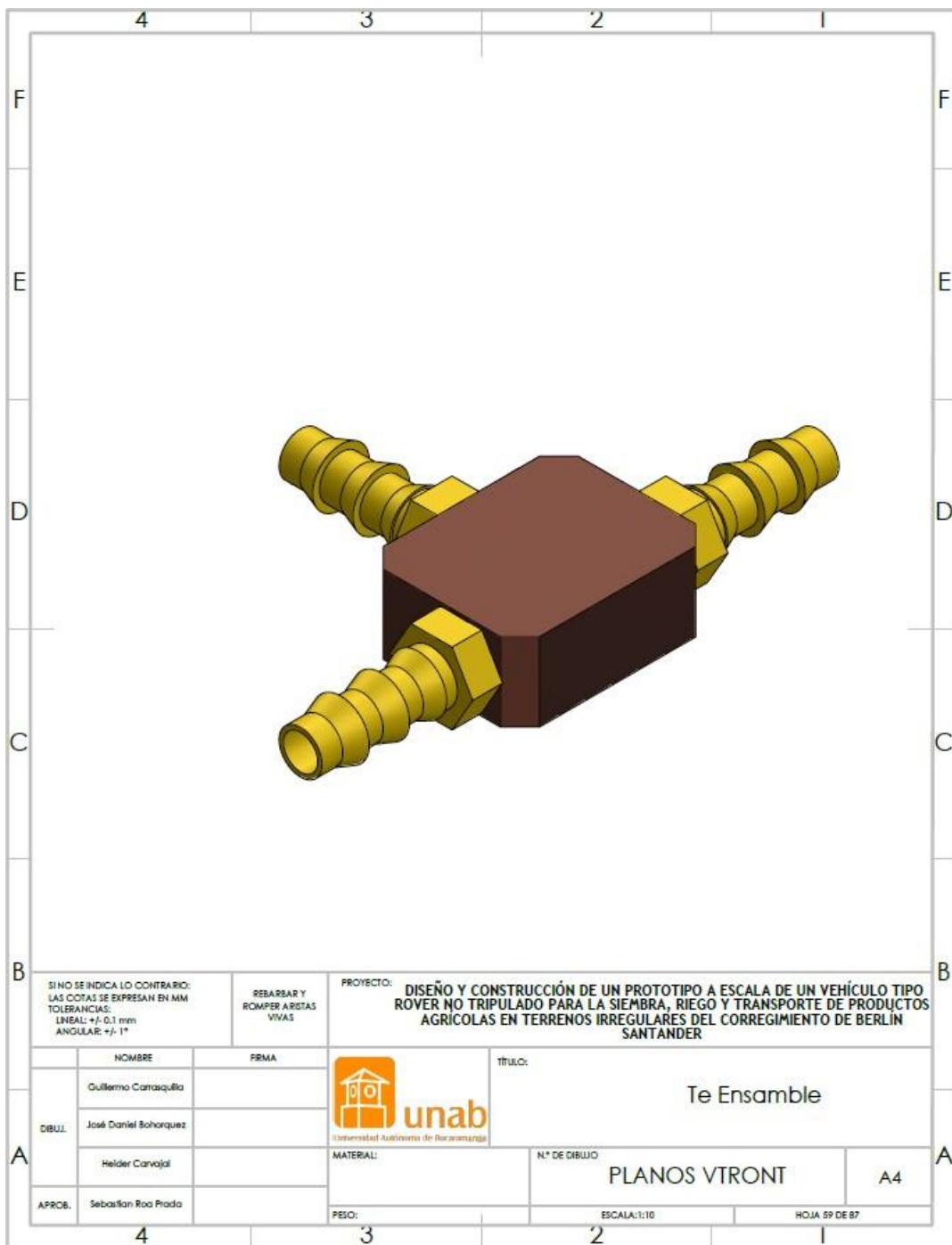


Ilustración 220 Ensamble de T con el espigo.

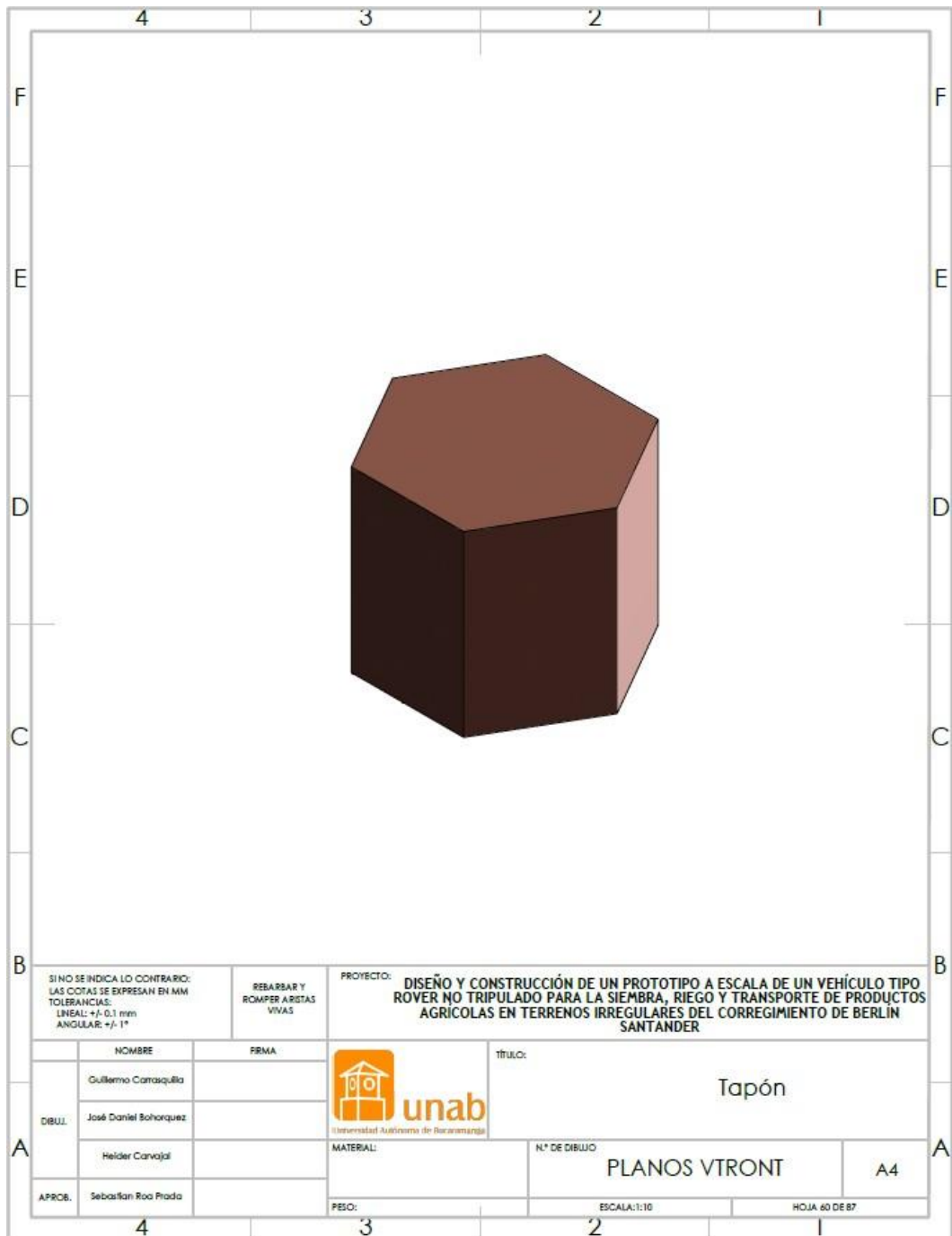


Ilustración 221 Vista isométrica del tapón (pieza estándar).

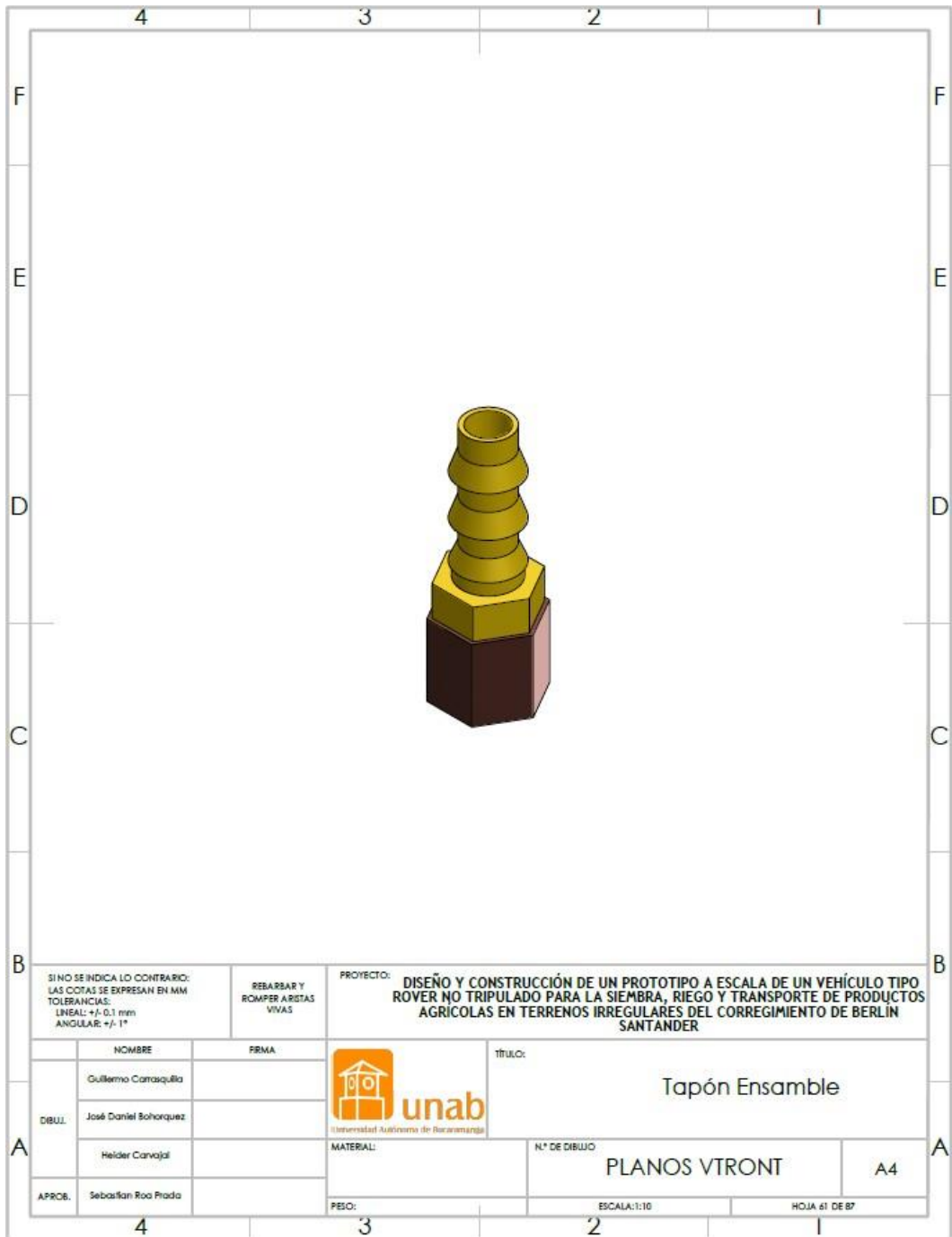


Ilustración 222 Ensamble del tapón con el espigo.

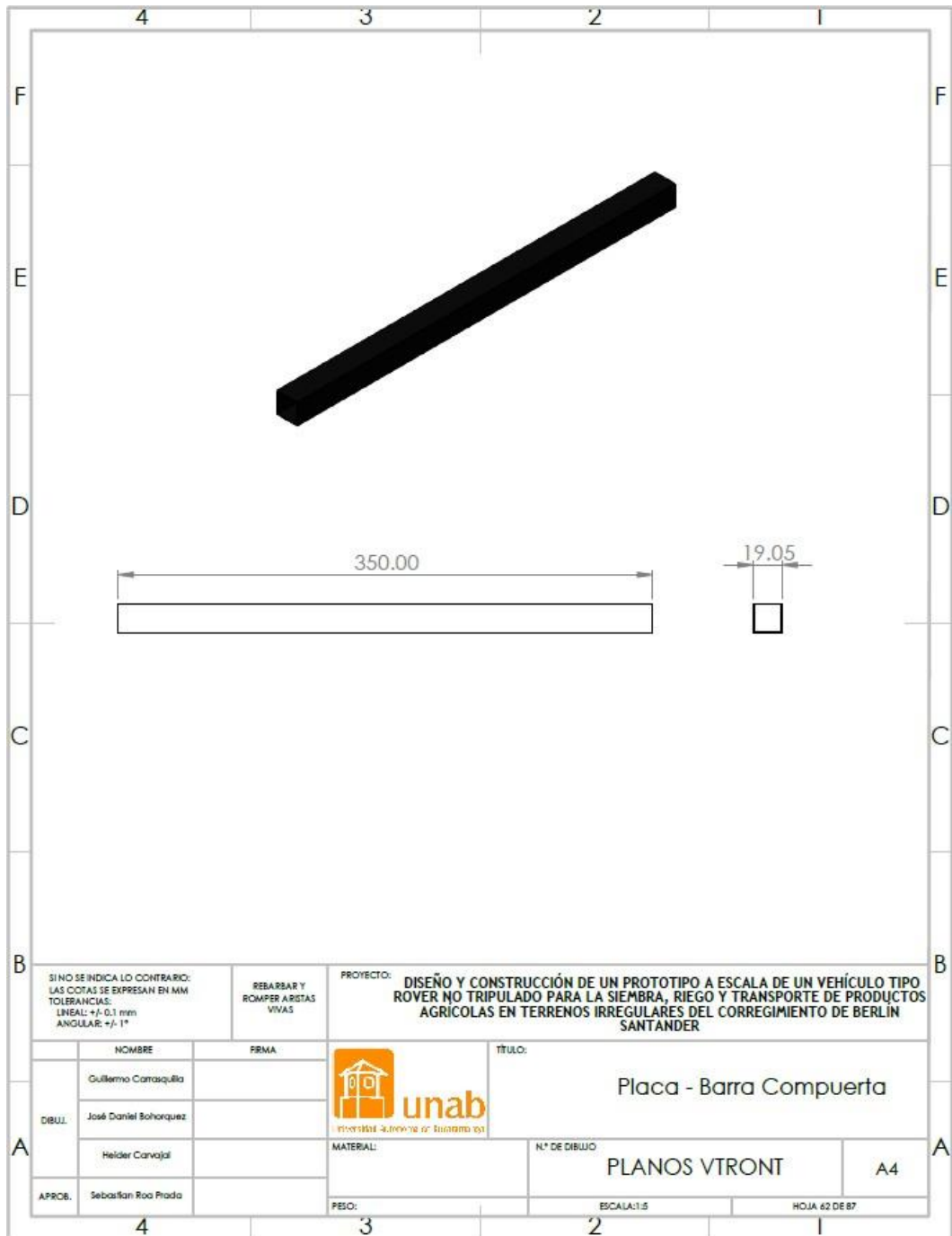


Ilustración 223 Plano de la barra de la compuerta de la placa.

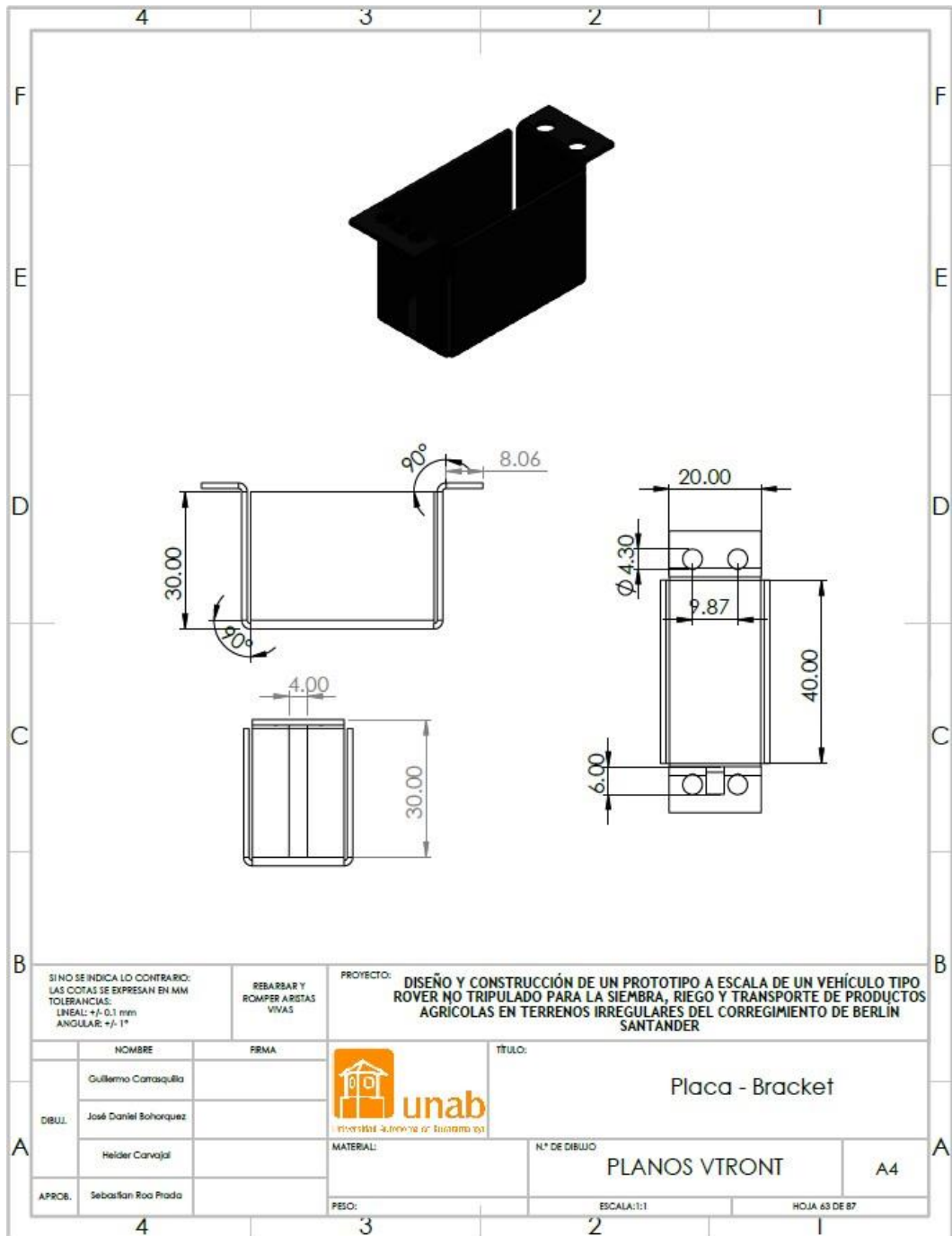


Ilustración 224 Plano de los brakets para la placa.

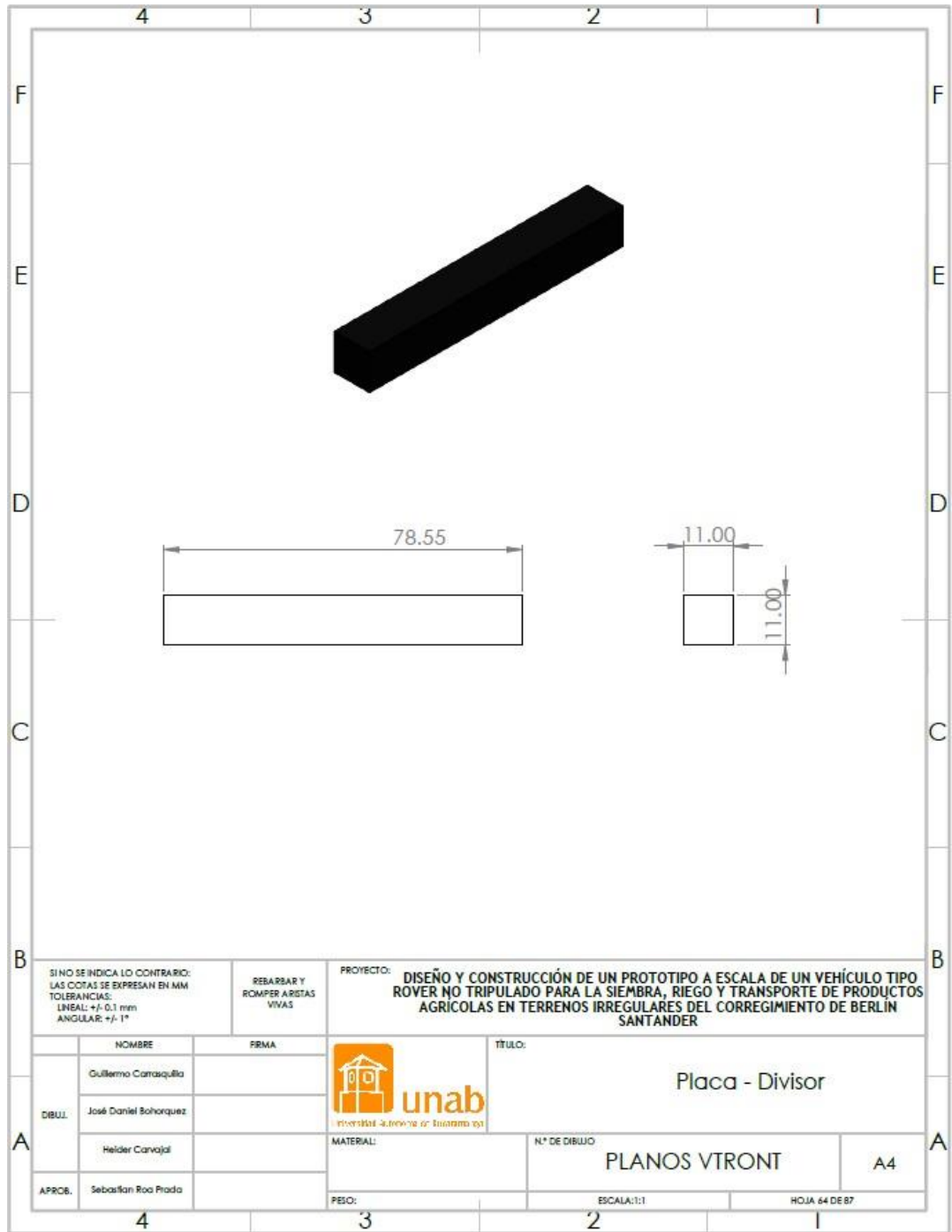


Ilustración 225 Plano del divisor de la placa.

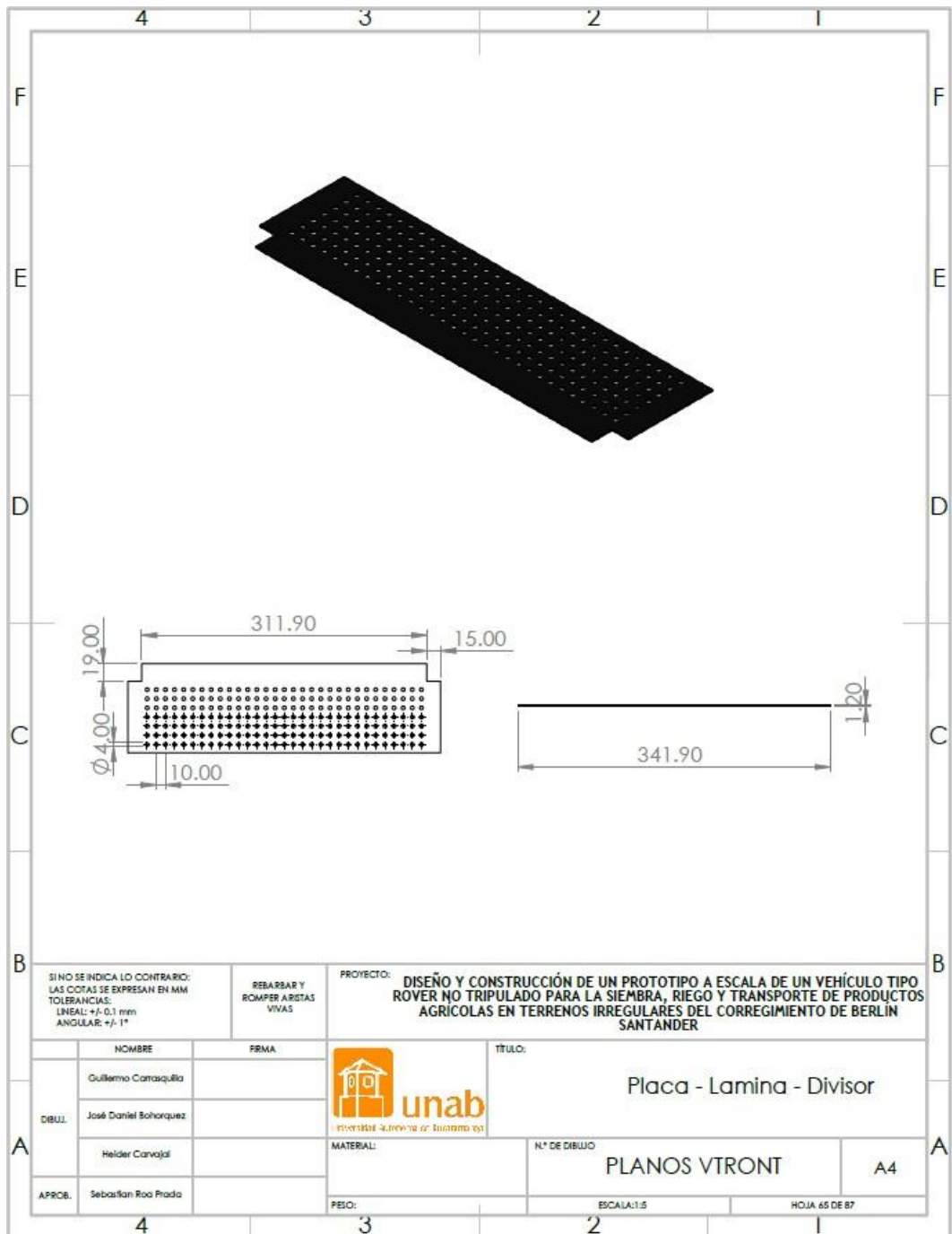


Ilustración 226 Plano lámina divisora de los componentes electrónicos.

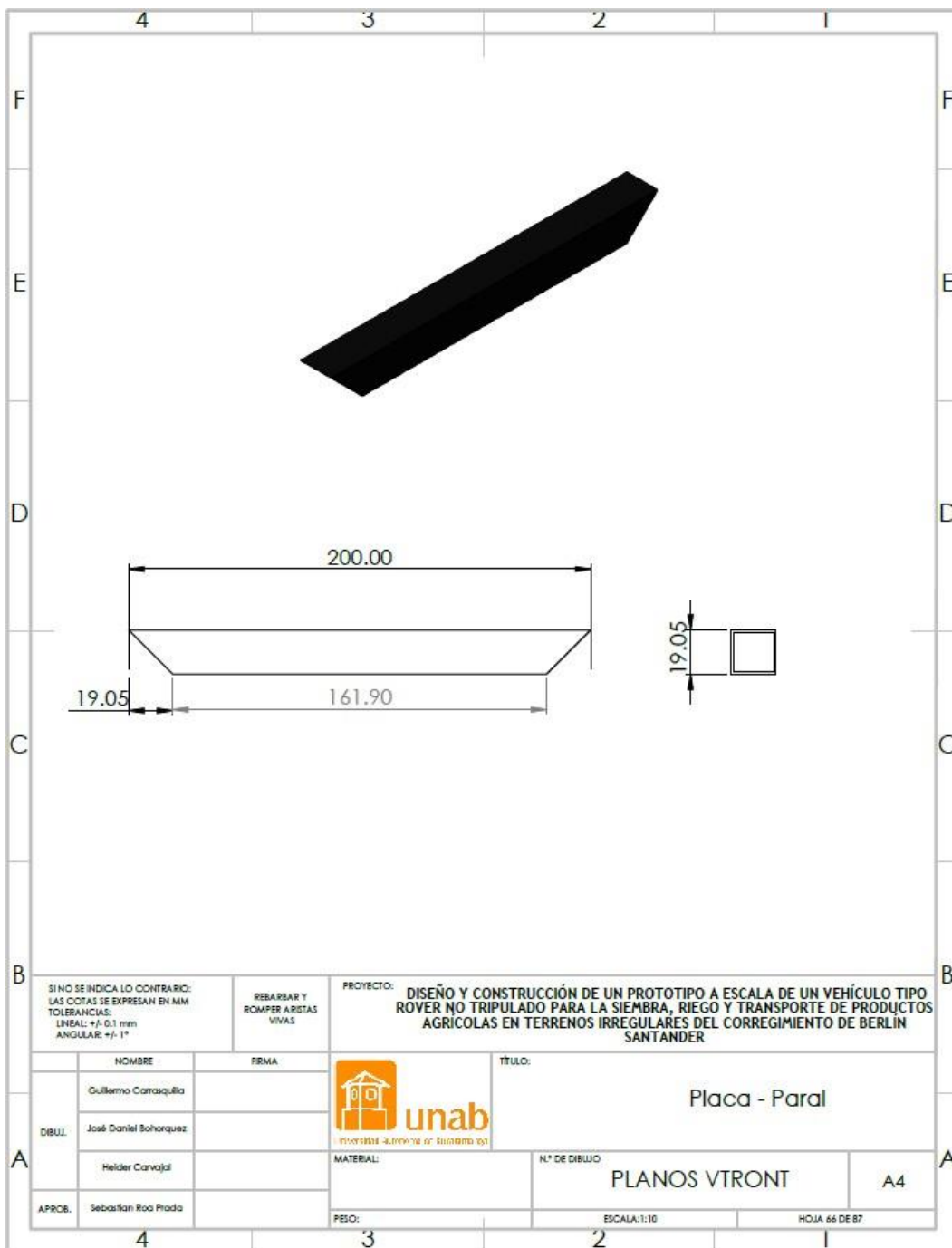


Ilustración 227 Plano paral de la placa.

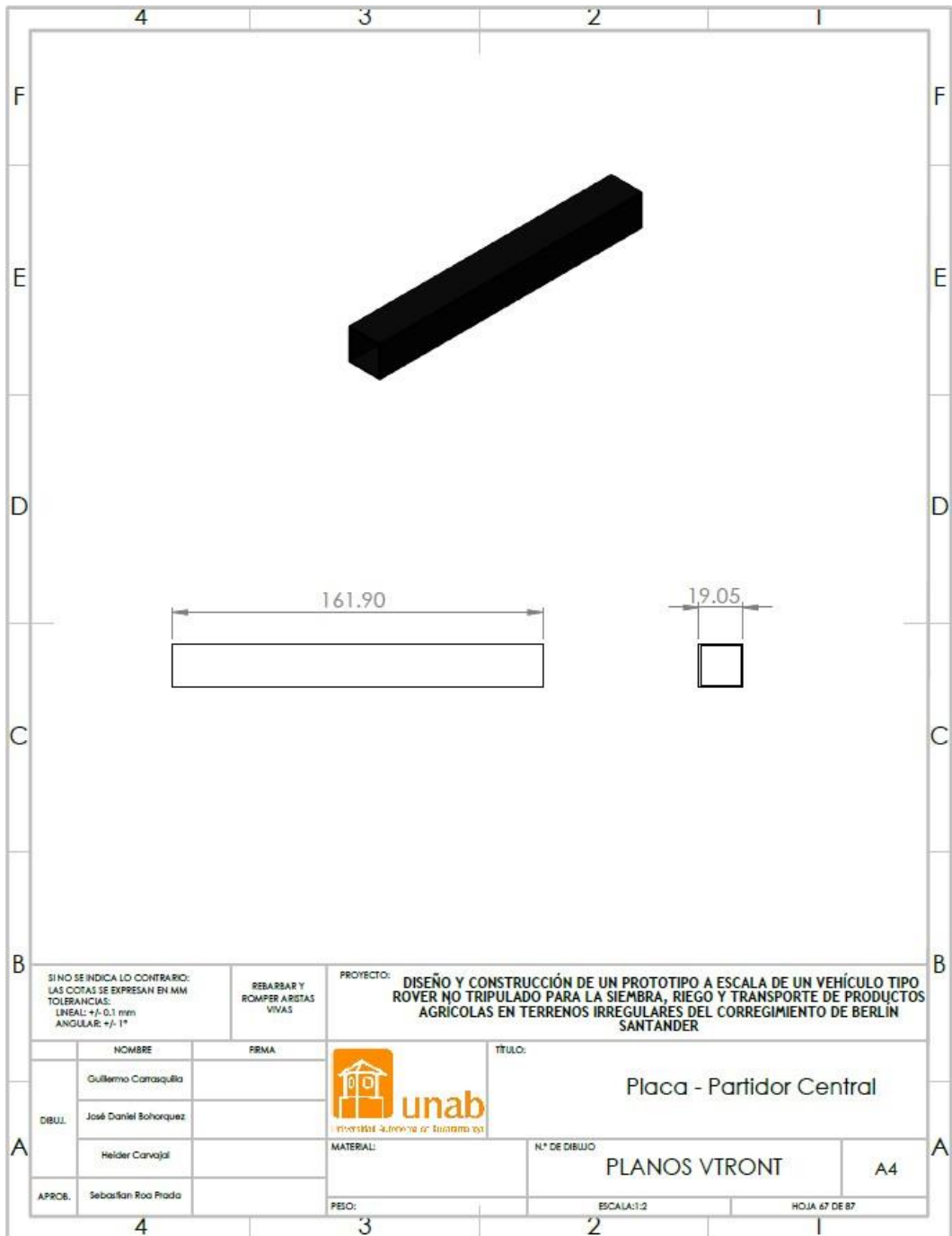
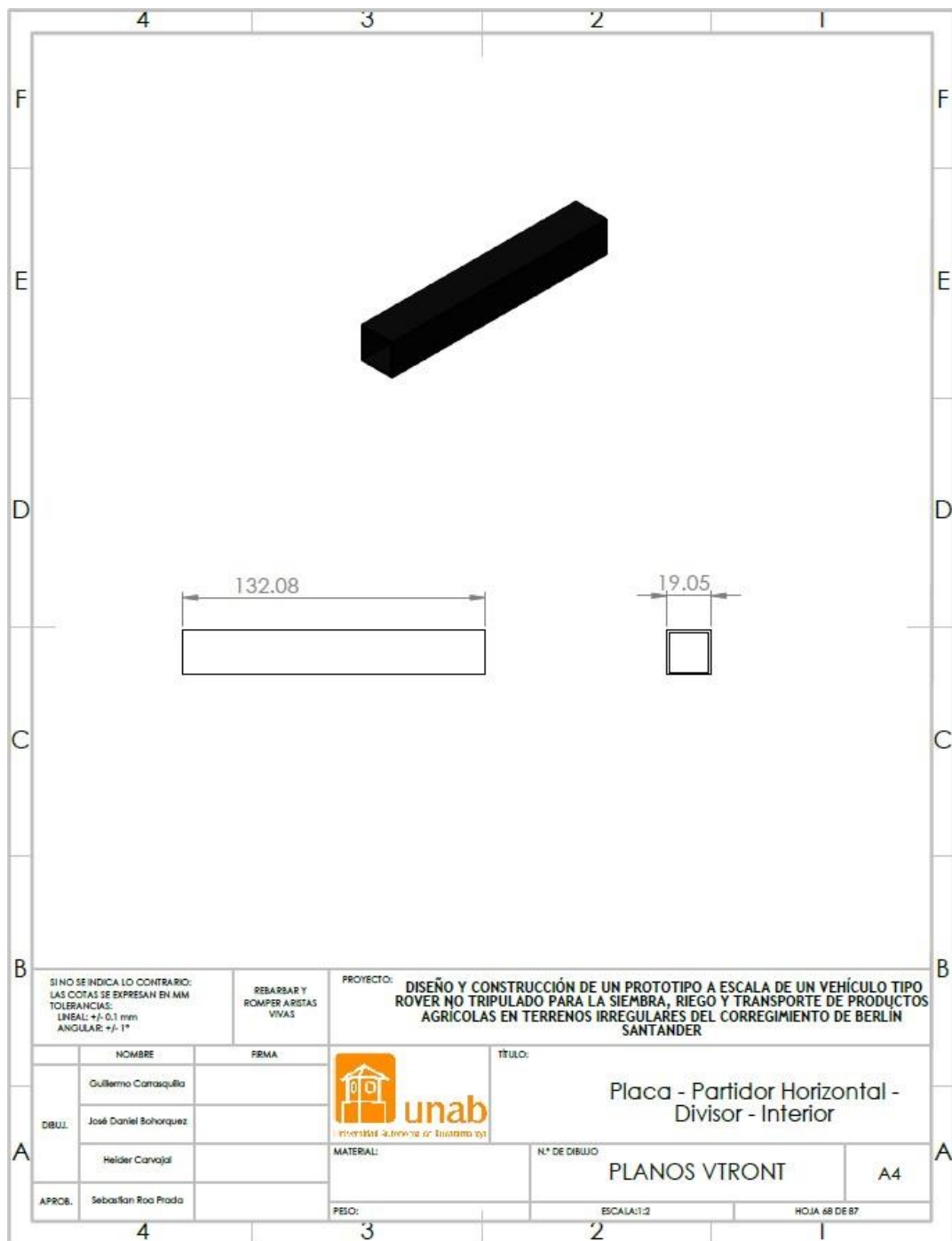


Ilustración 228 Plano partidor central de la placa.



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: LINEAL: +/- 0.1 mm ANGULAR: +/- 1°		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE UN VEHÍCULO TIPO ROVER NO TRIPULADO PARA LA SIEMBRA, RIEGO Y TRANSPORTE DE PRODUCTOS AGRICOLAS EN TERRENOS IRREGULARES DEL CORREGIMIENTO DE BERLIN SANTANDER
DIBUJ. APROB.	NOMBRE Guillermo Carrasquilla	FIRMA	 TÍTULO: Placa - Partidor Horizontal - Divisor - Interior
	José Daniel Bohorquez		
	Heider Carvajal		ESCALA: 1:2
Sebastián Roa Prada		PESO:	HOJA 68 DE 87

Ilustración 229 Plano partidor horizontal divisor interior.

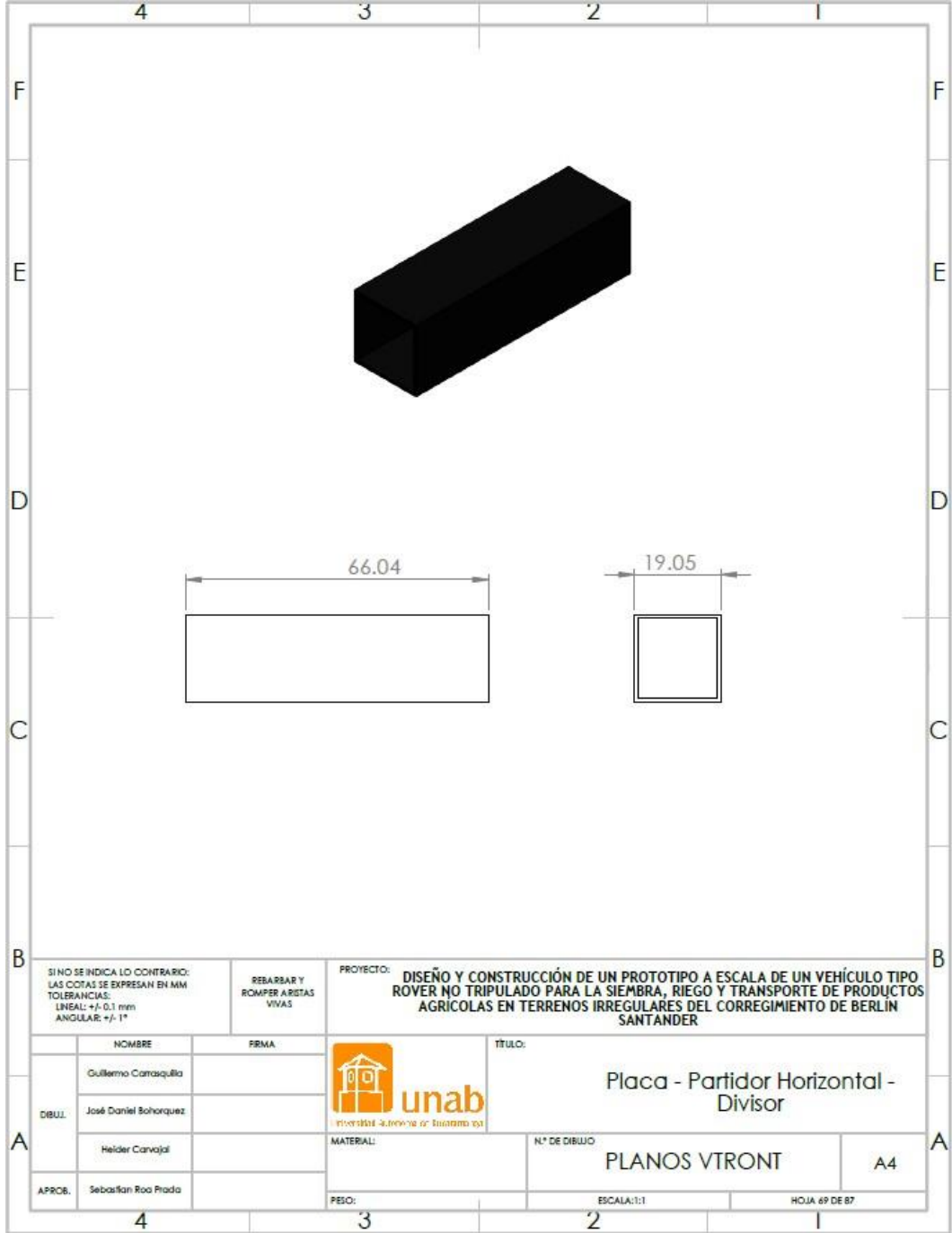


Ilustración 230 Plano del partidor horizontal del divisor de la placa.

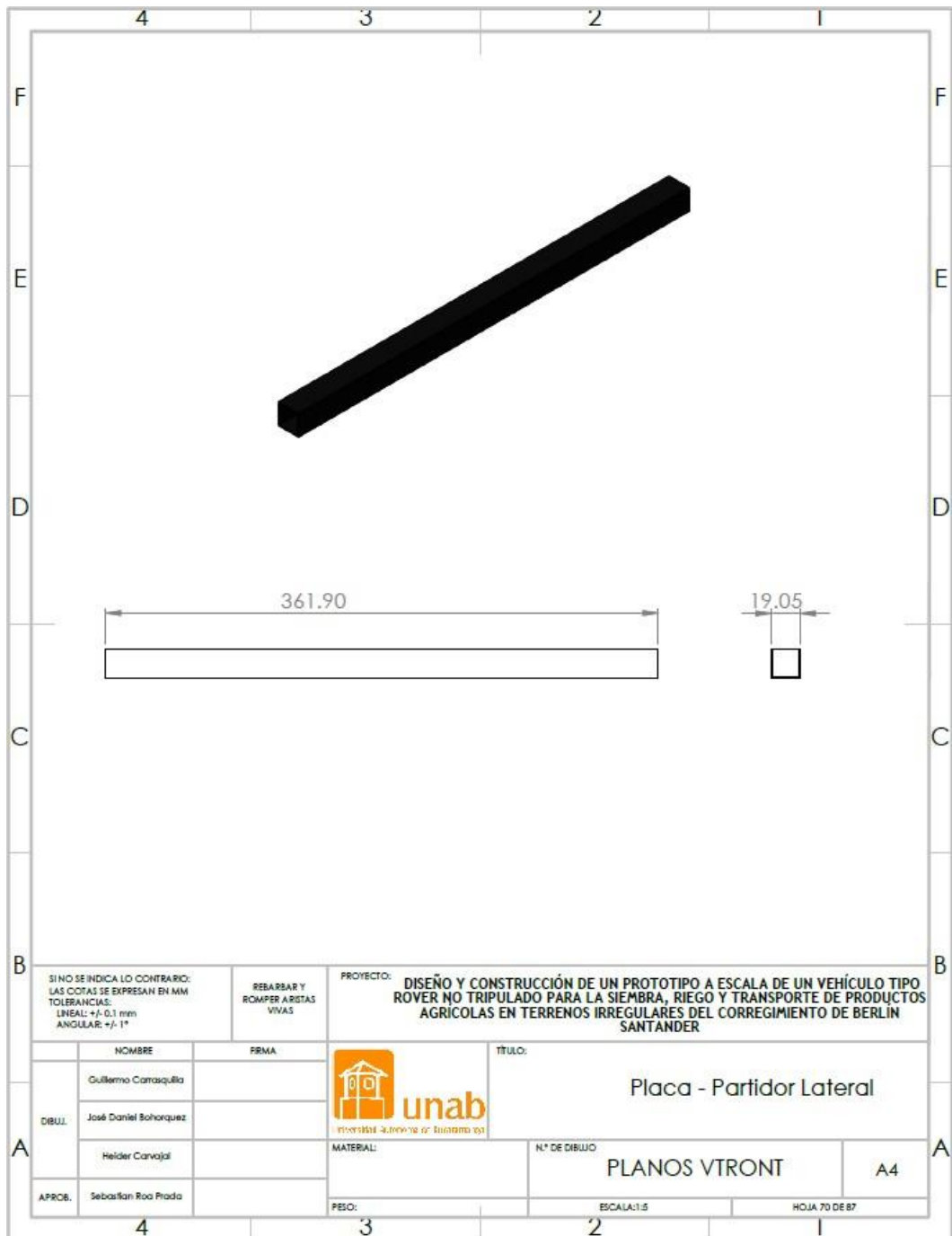


Ilustración 231 Plano del partidor lateral de la placa.

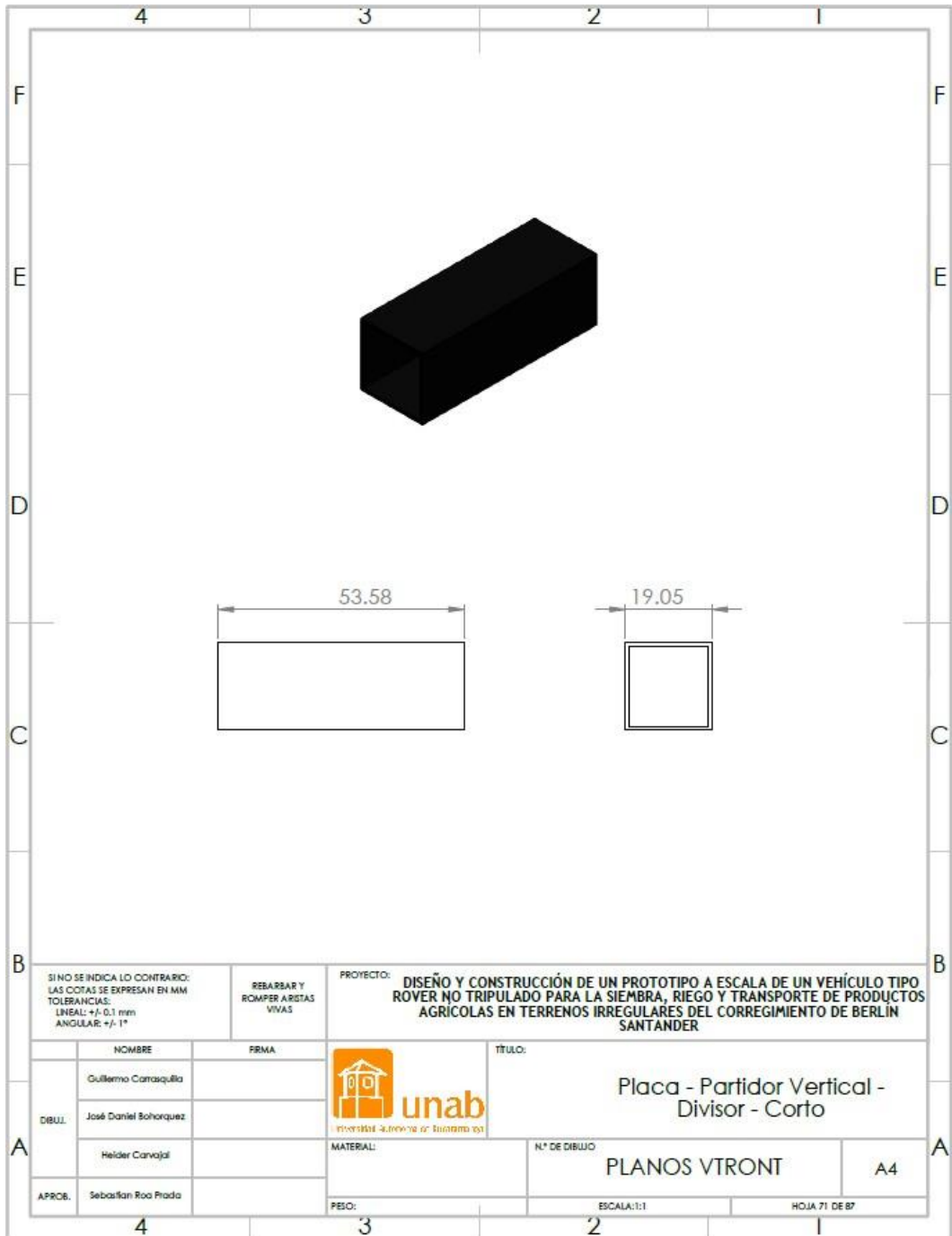


Ilustración 232 Plano del partidor vertical corto del divisor de la placa.

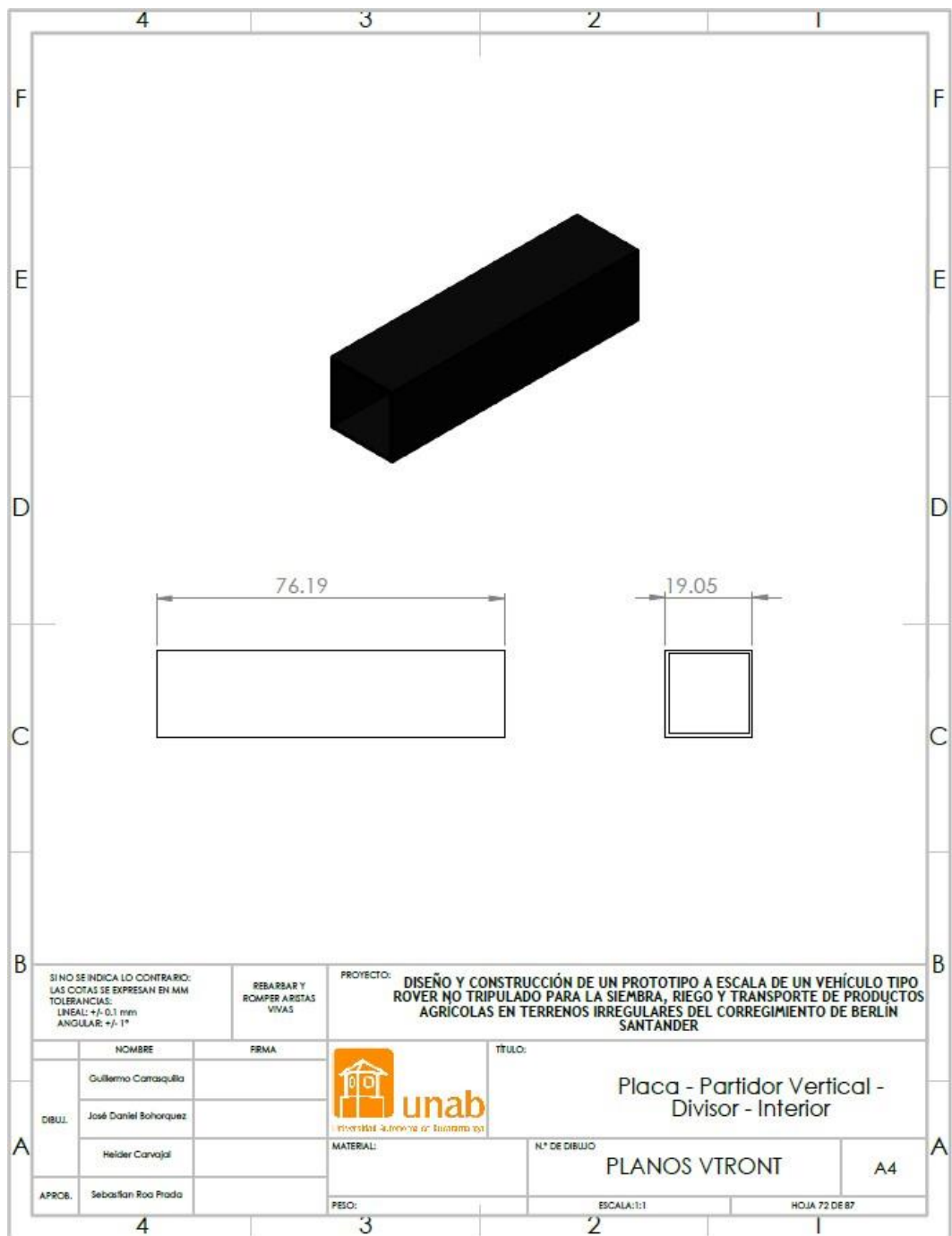


Ilustración 233 Plano del partidor vertical interior de la placa.

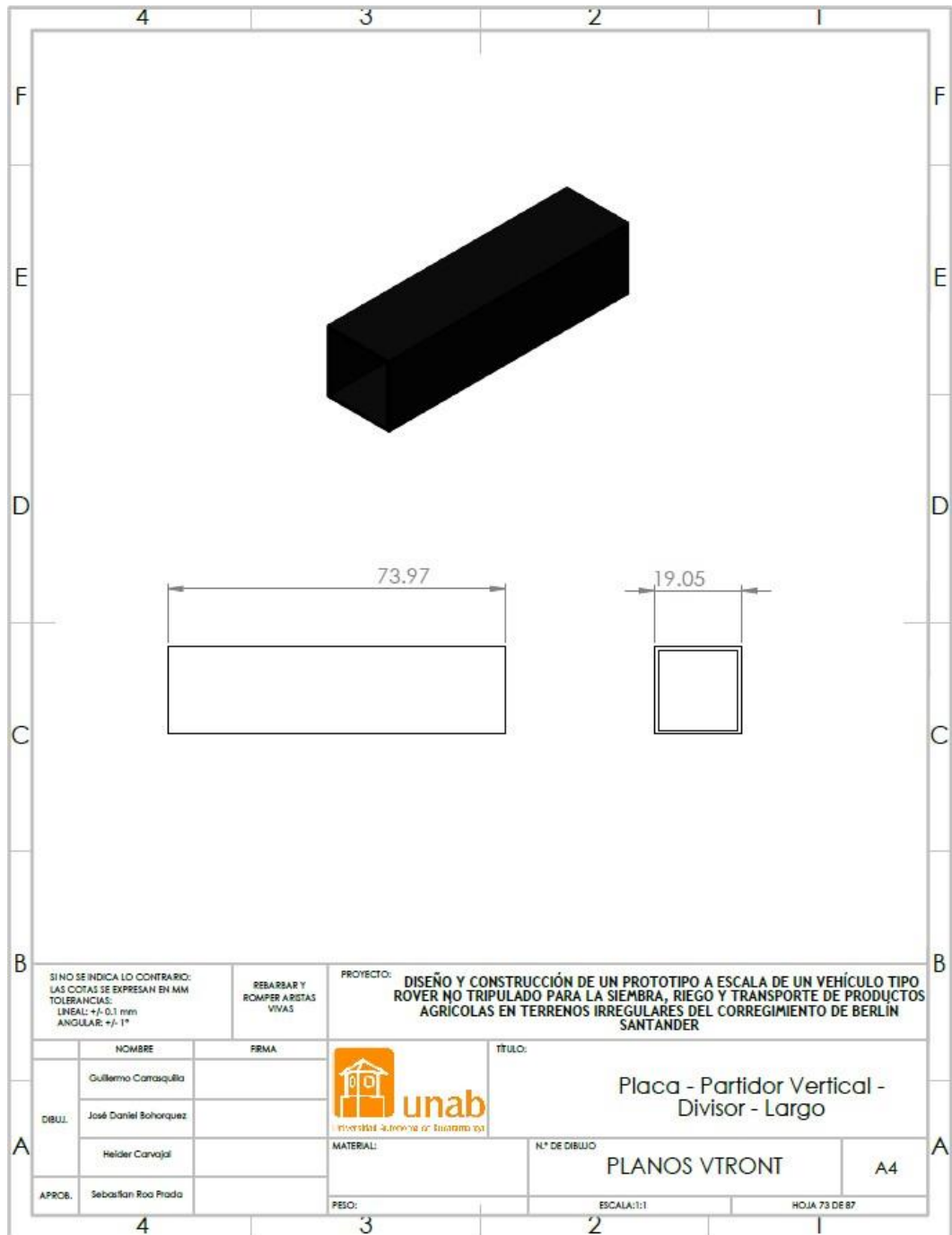


Ilustración 234 Plano del partidor vertical largo del divisor de la placa.

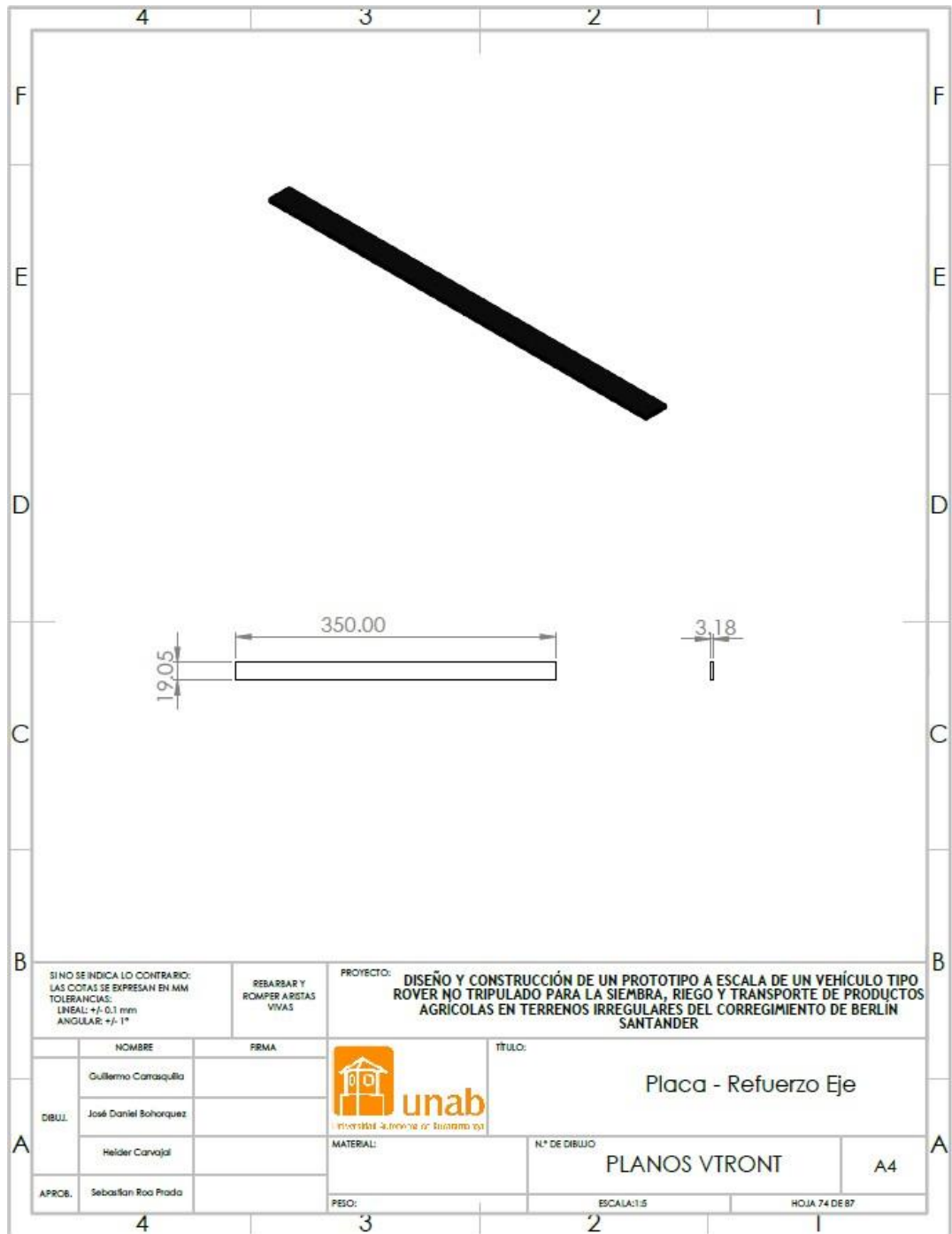


Ilustración 235 Plano de la platina de refuerzo para el eje de la placa.

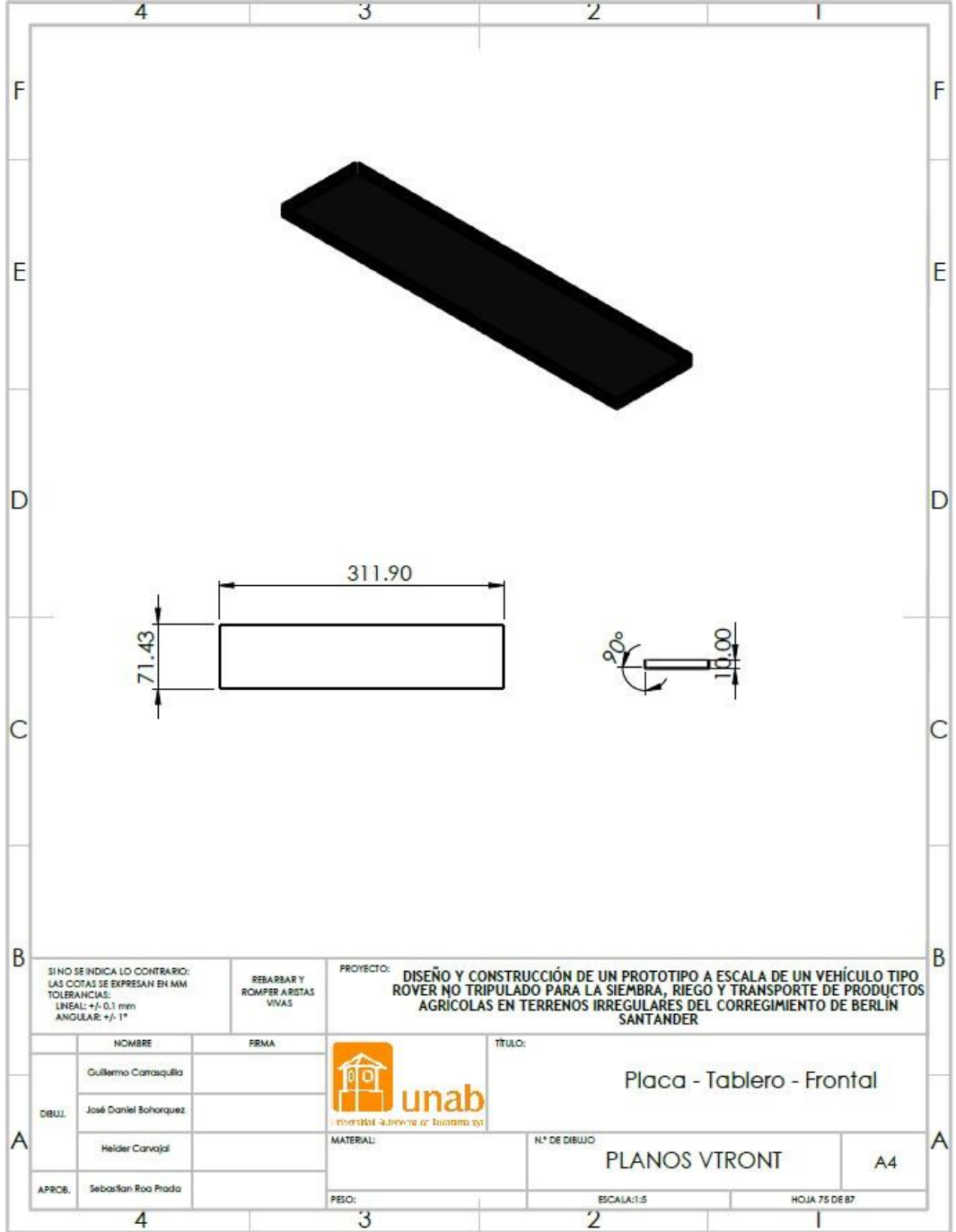


Ilustración 236 Plano tablero divisor de la placa.

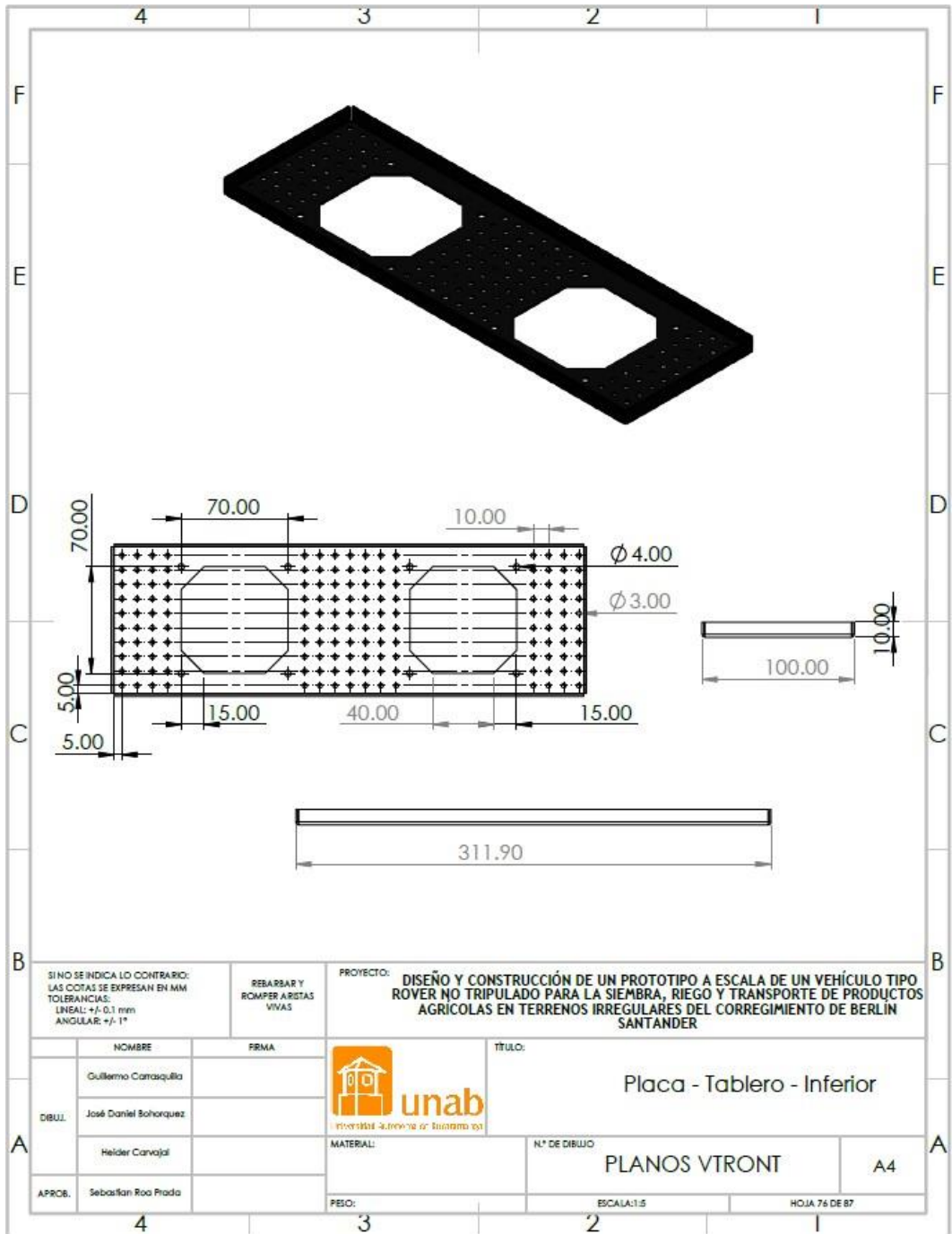


Ilustración 237 Plano del tablero inferior para entrada de aire a los componentes electrónicos.

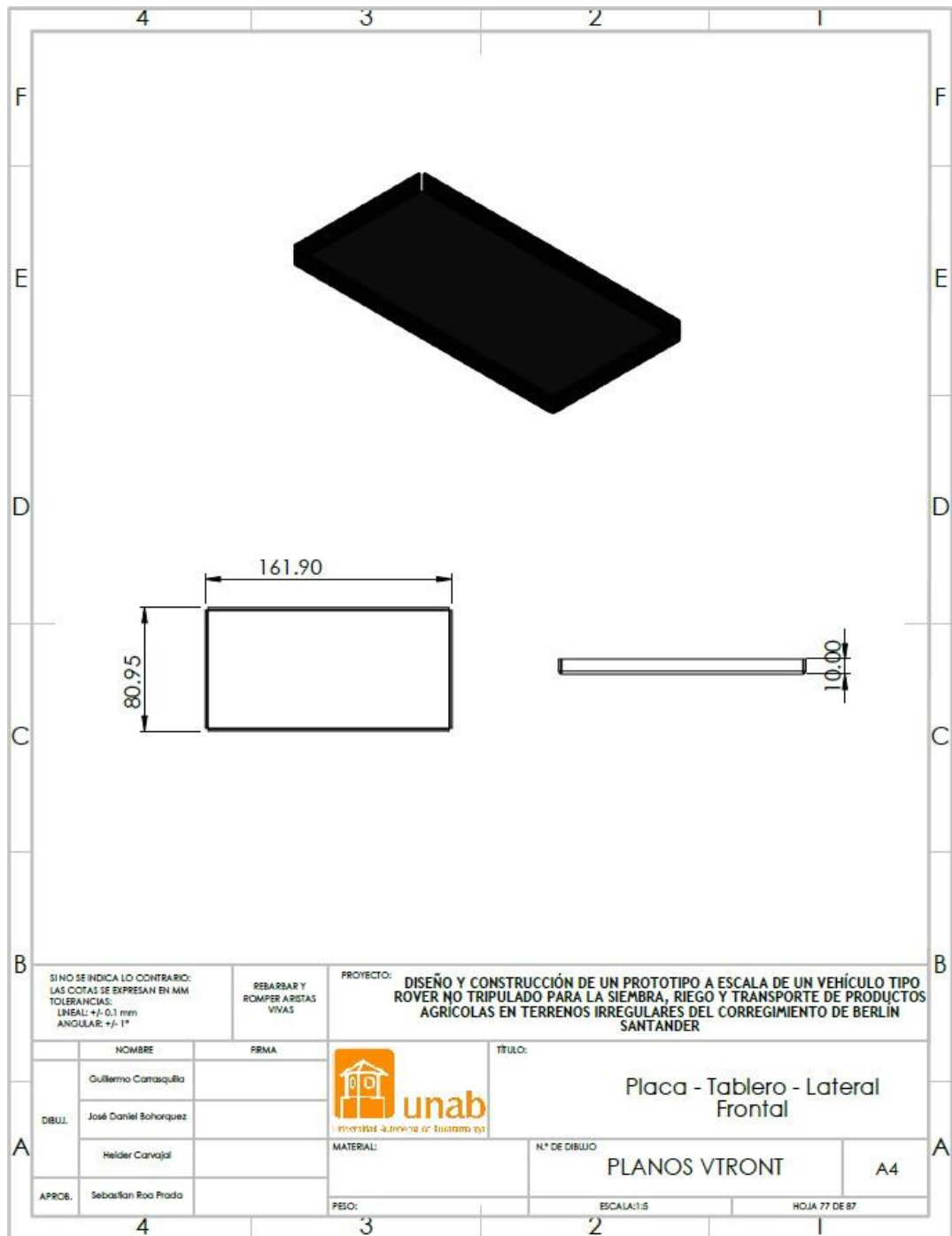


Ilustración 238 Plano del tablero lateral frontal de la placa.

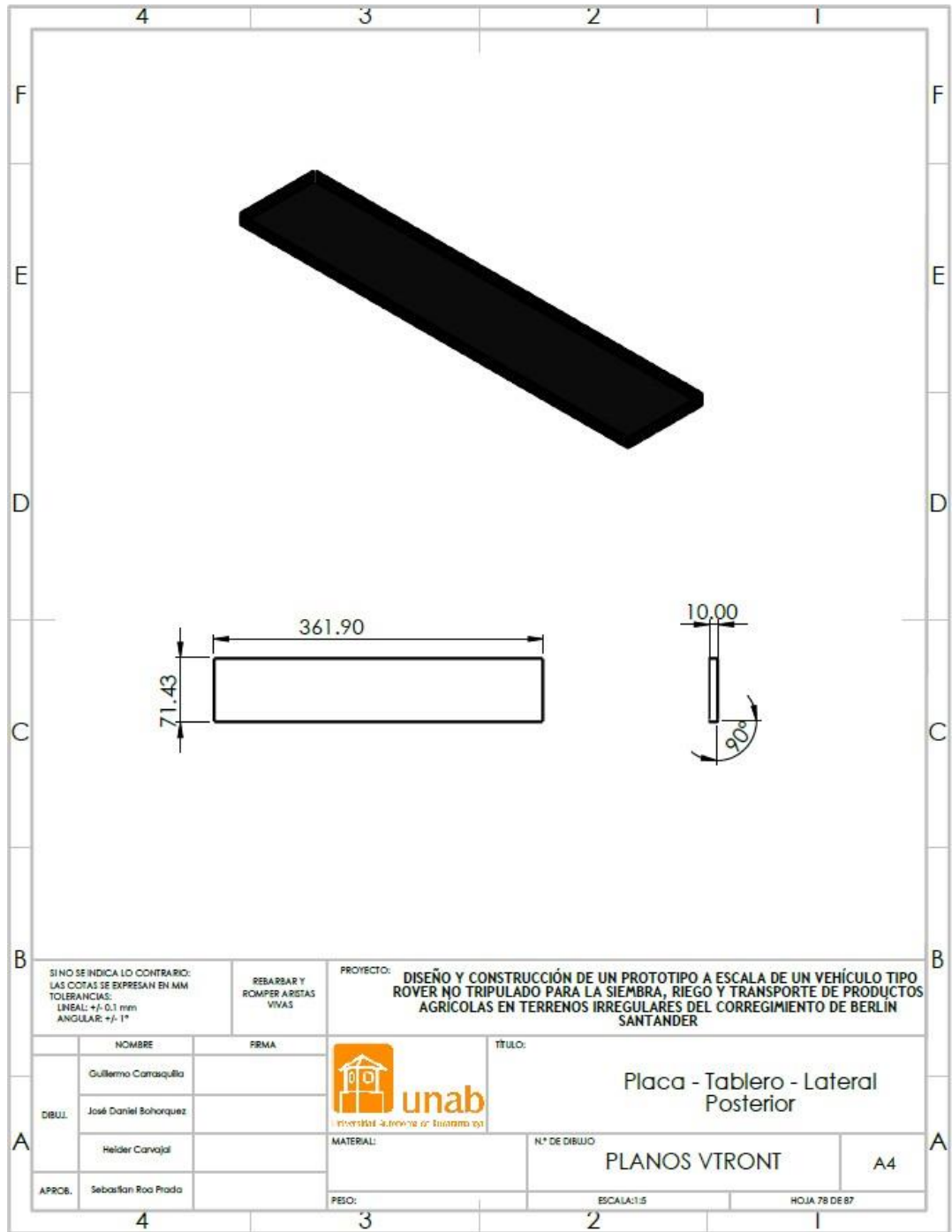


Ilustración 239 Plano del tablero lateral posterior de la placa.

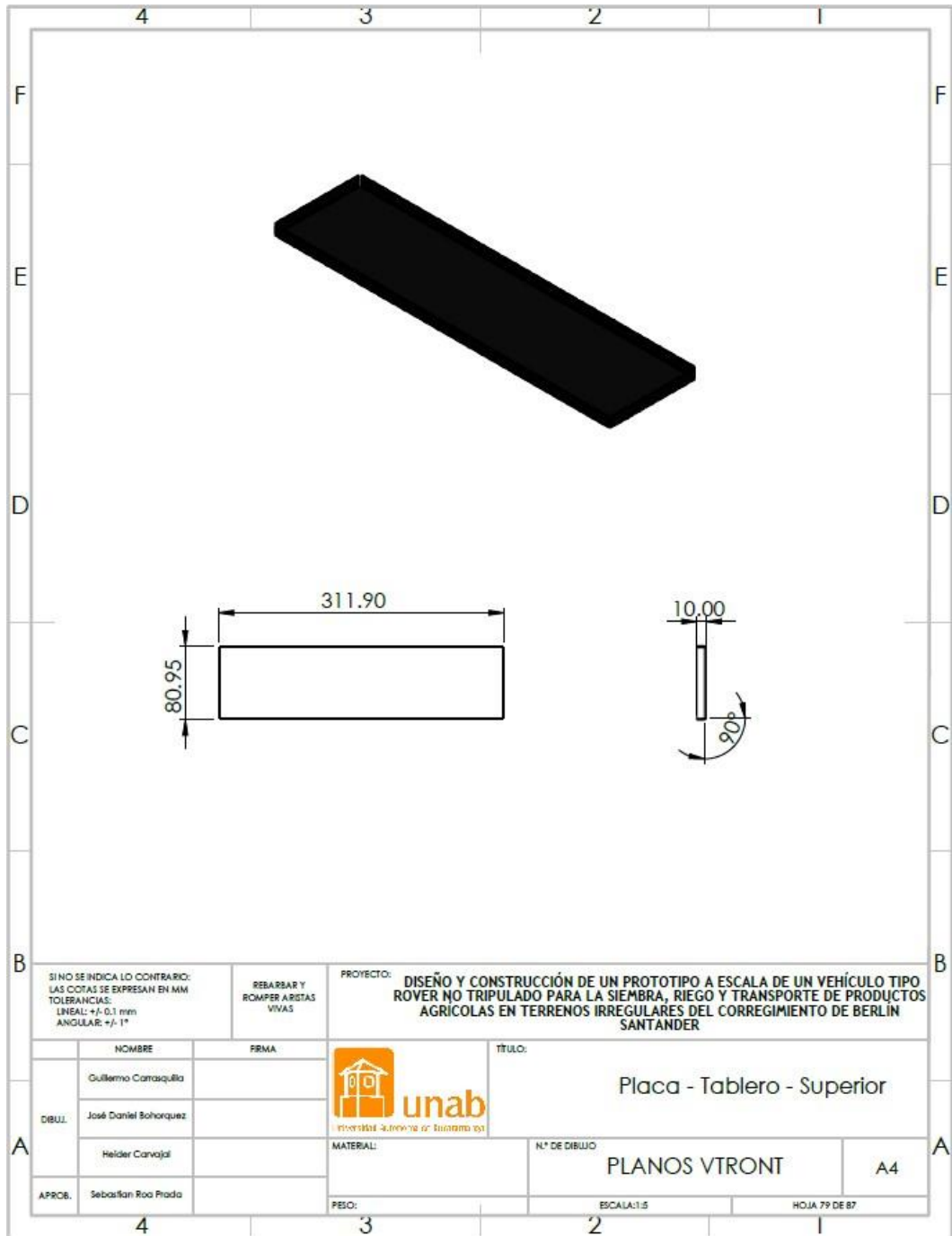


Ilustración 240 Plano tablero superior de la placa.

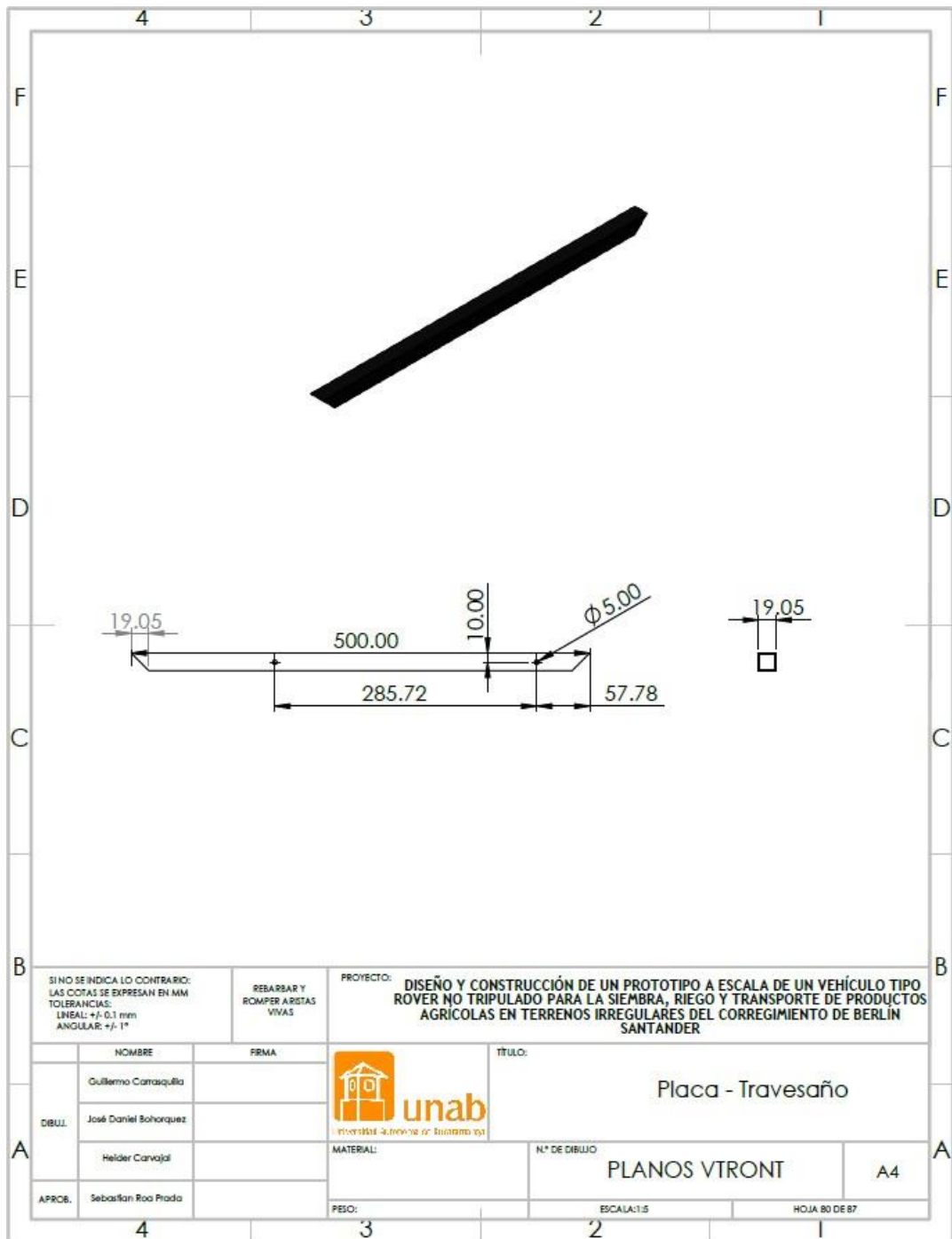


Ilustración 241 Plano del travesaño de la placa.

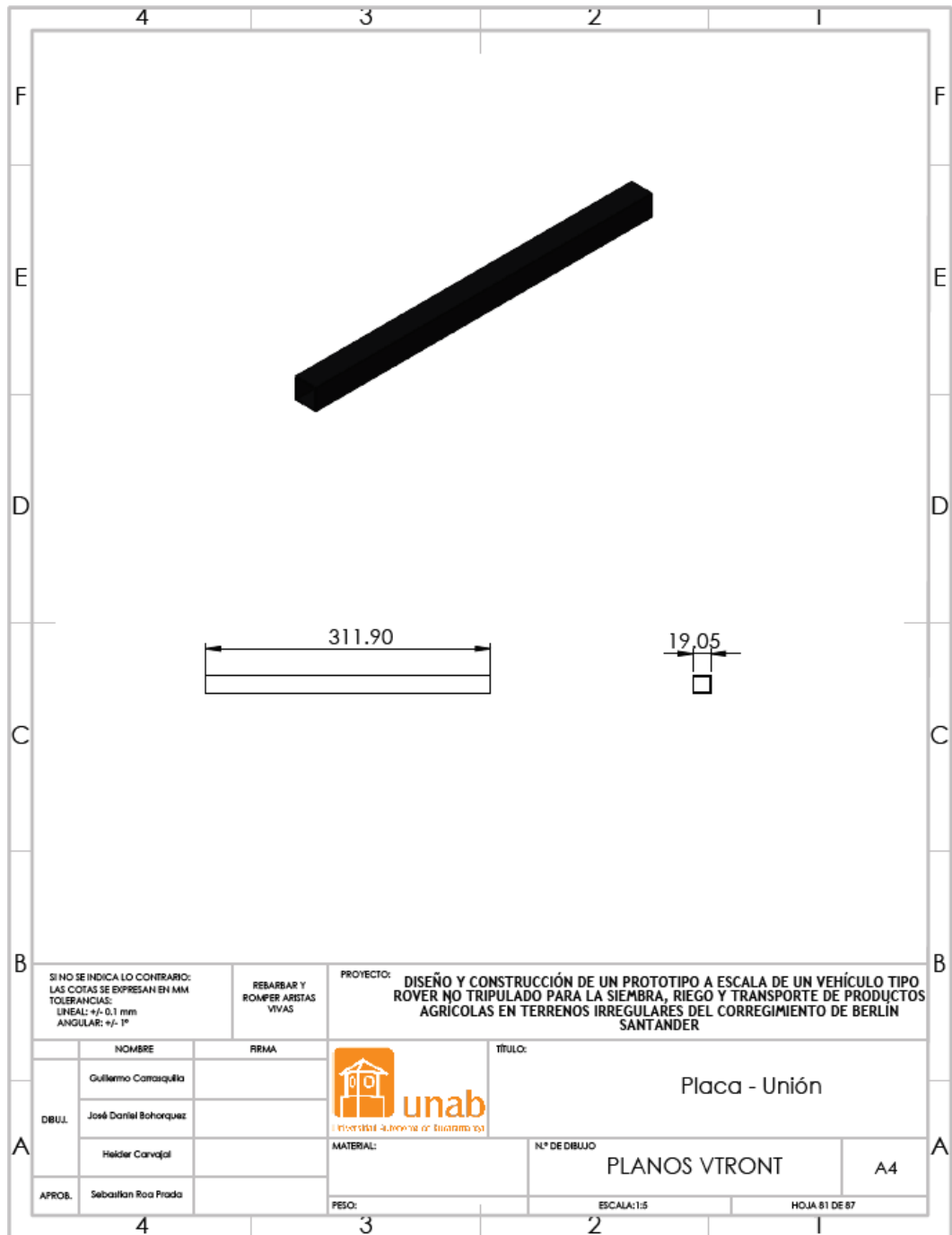


Ilustración 242 Plano de la pieza unión de la placa.

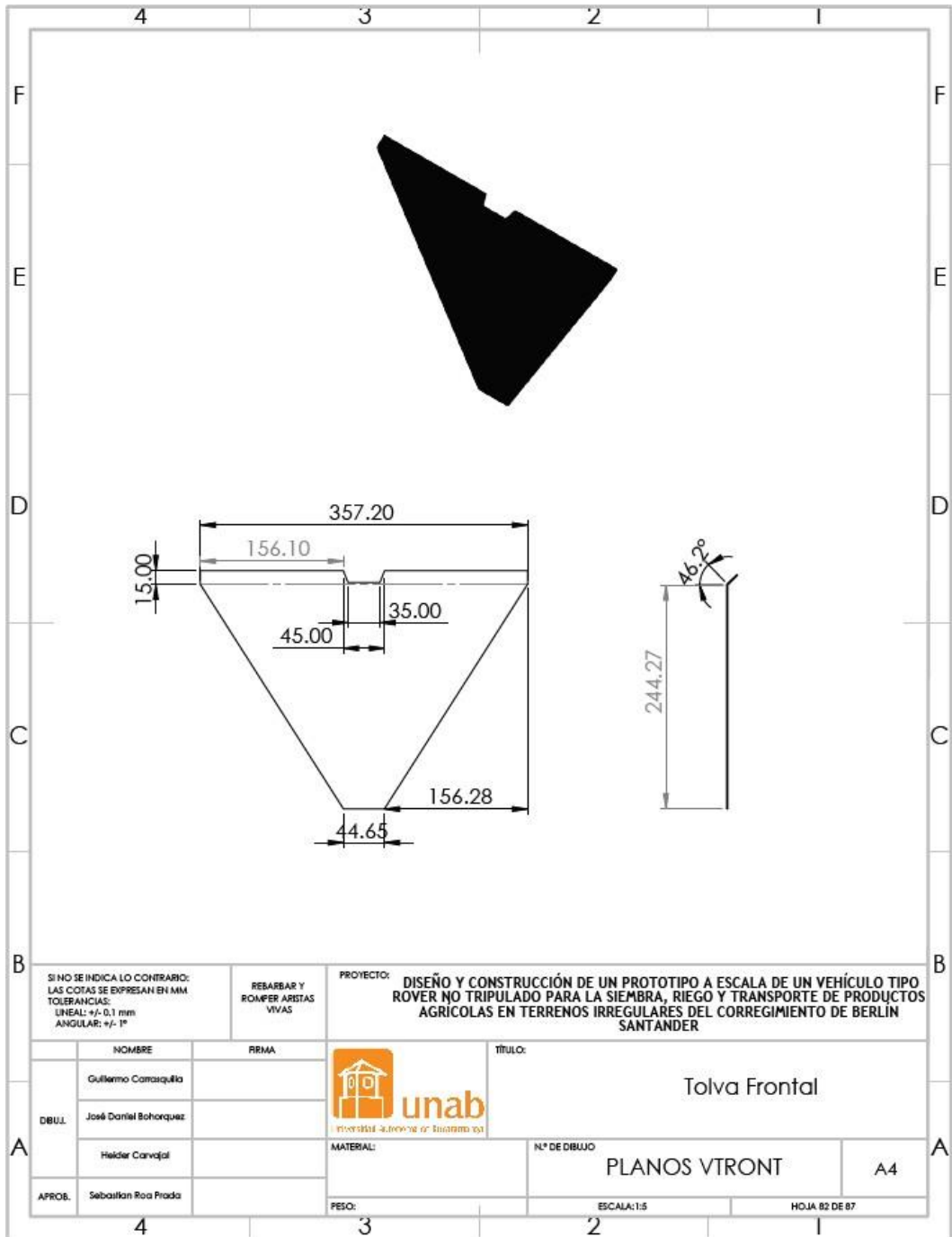


Ilustración 243 Plano de la tolva de la parte frontal.

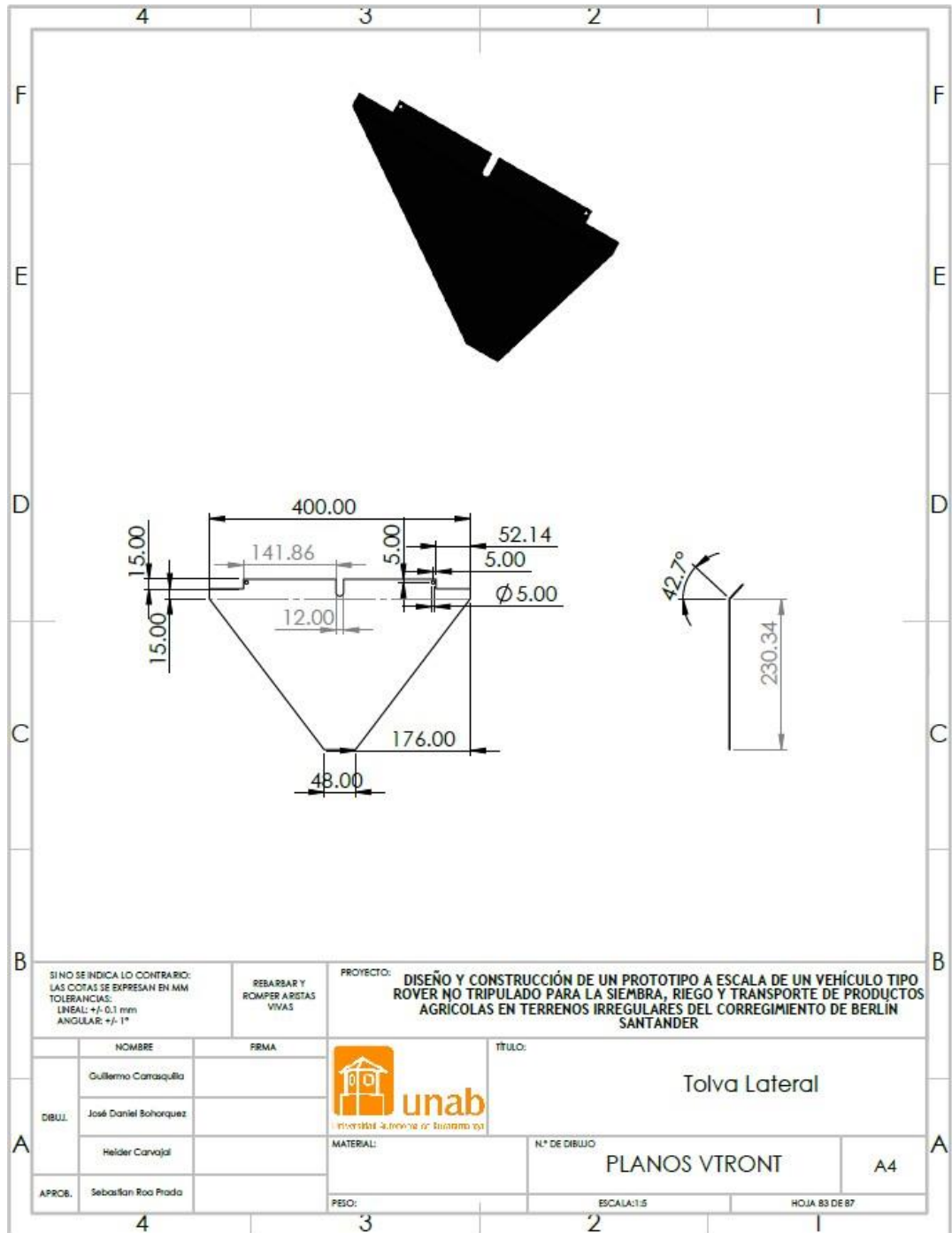


Ilustración 244 Plano de la tolva de la parte lateral.

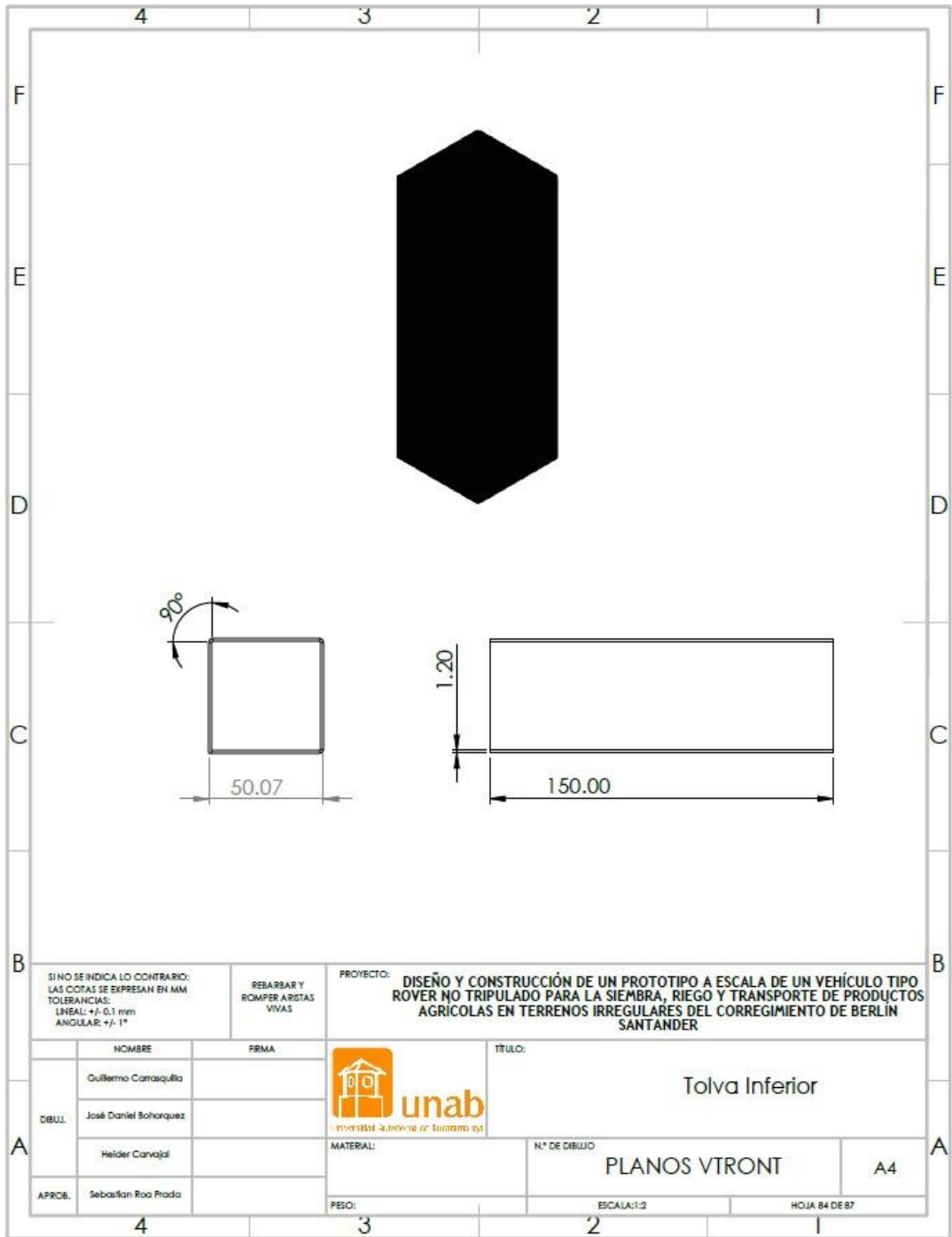


Ilustración 245 Plano de la tolva parte inferior.

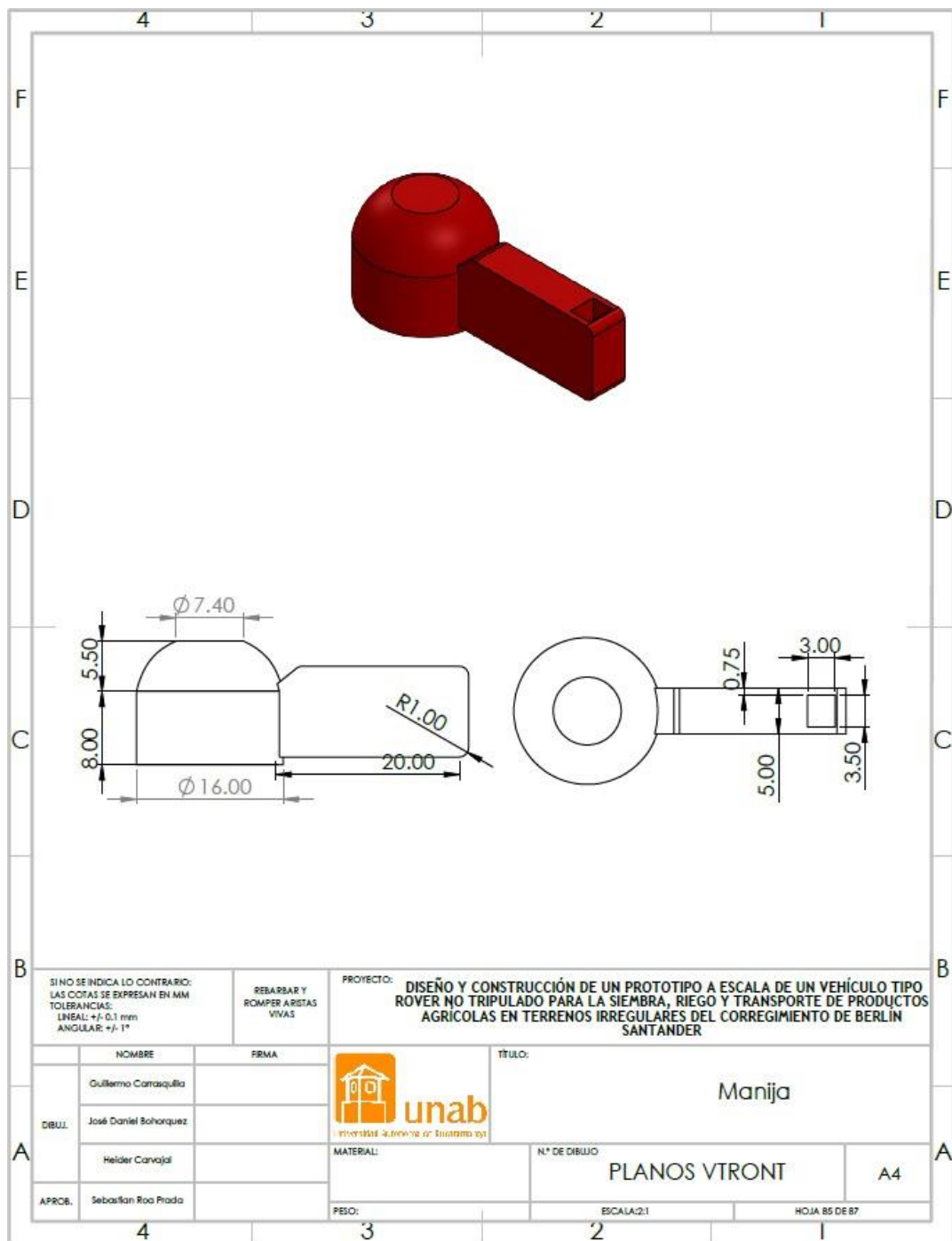
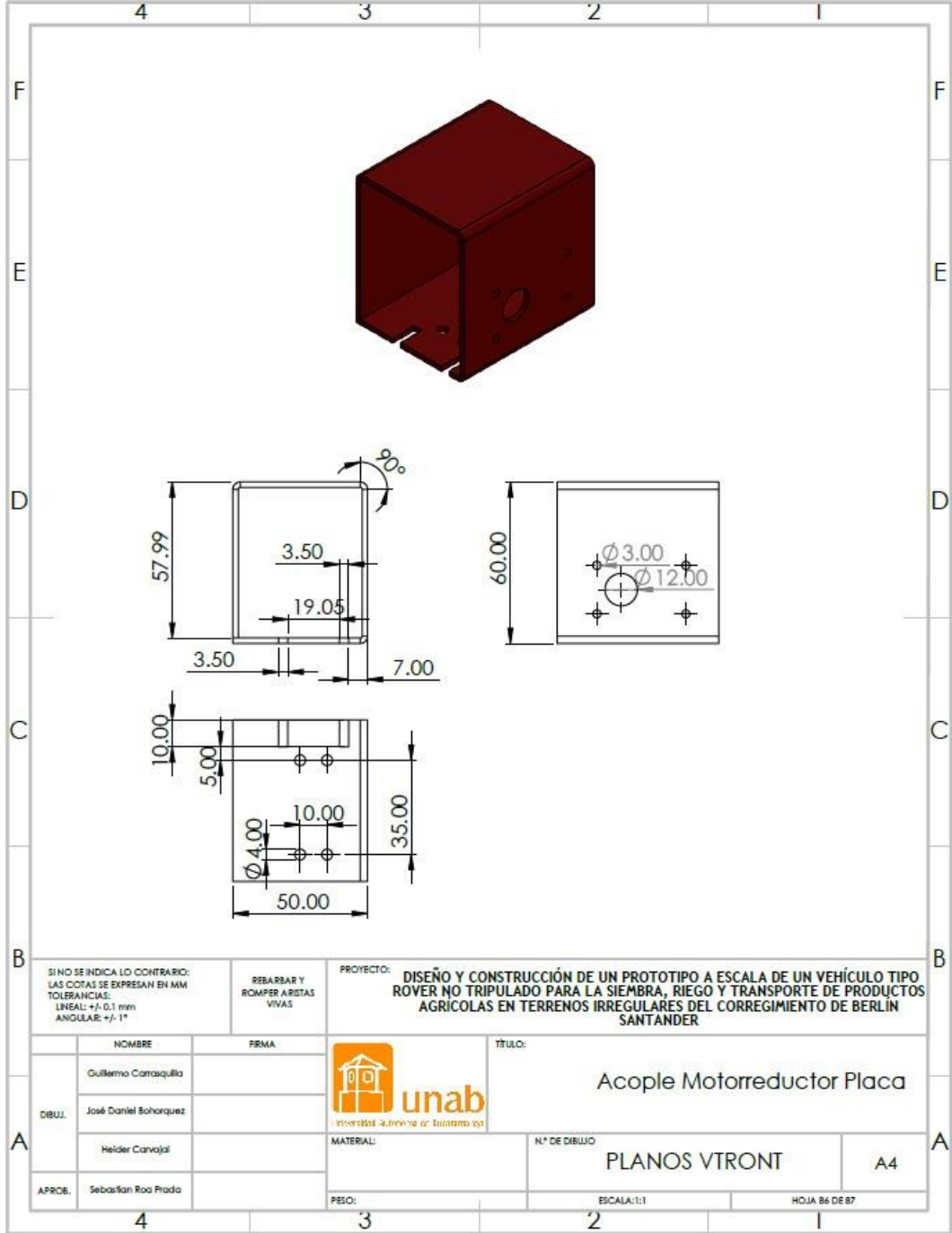
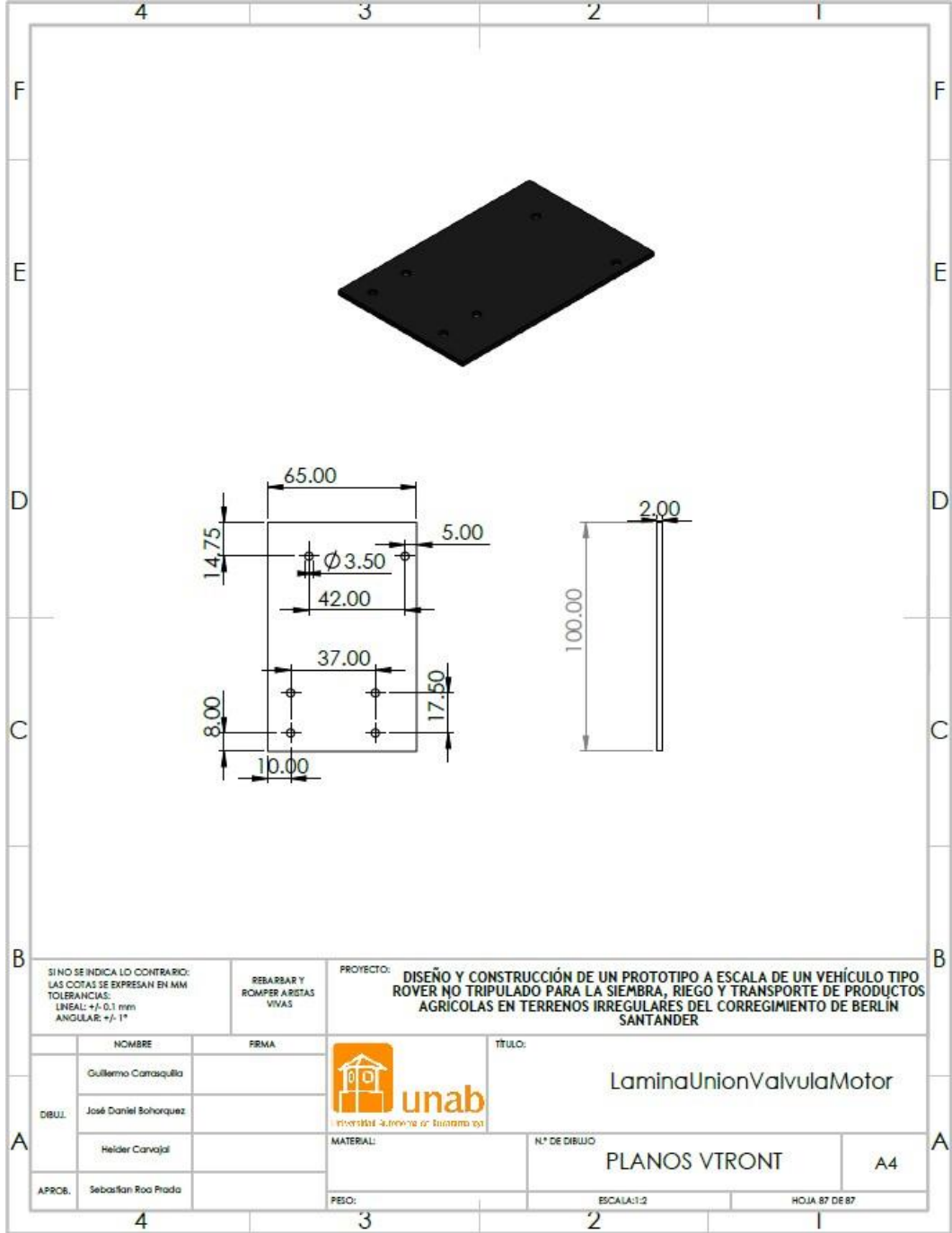


Ilustración 246 Plano manija de la válvula reguladora de caudal.



SIN O SE INDICA LO CONTRARIO: LAS CORTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: LINEAL: ± 0.1 mm ANGULAR: $\pm 1^\circ$		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE UN VEHÍCULO TIPO ROVER NO TRIPULADO PARA LA SIEMBRA, RIEGO Y TRANSPORTE DE PRODUCTOS AGRICOLAS EN TERRENOS IRREGULARES DEL CORREGIMIENTO DE BERLIN SANTANDER	
DIBUJ. APROB.	NOMBRE Guillermo Carasquilla	FIRMA		TITULO: Acople Motorreductor Placa
	José Daniel Boharquez			MATERIAL:
	Heider Carvajal			ESCALA: 1:1
	Sebastián Roo Prada		PESO:	HOJA 86 DE 87

Ilustración 247 Plano acople del motorreductor al mecanismo.



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS CORTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: LINEAL: ± 0.1 mm ANGULAR: $\pm 1^\circ$		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE UN VEHÍCULO TIPO ROVER NO TRIPULADO PARA LA SIEMBRA, RIEGO Y TRANSPORTE DE PRODUCTOS AGRICOLAS EN TERRENOS IRREGULARES DEL CORREGIMIENTO DE BERLIN SANTANDER		
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA		TITULO:	
	Guillermo Casasquilla			LaminaUnionValvulaMotor	
	José Daniel Boharquez				
	Heider Carvajal		MATERIAL:	N° DE DIBUJO	
APROB.	Sebastian Roo Prada			PLANOS VTRONT	A4
		PESO:	ESCALA: 1:2		HOJA 87 DE 87

Ilustración 248 Plano de soporte del sistema de control de riego (válvula y servomotor).

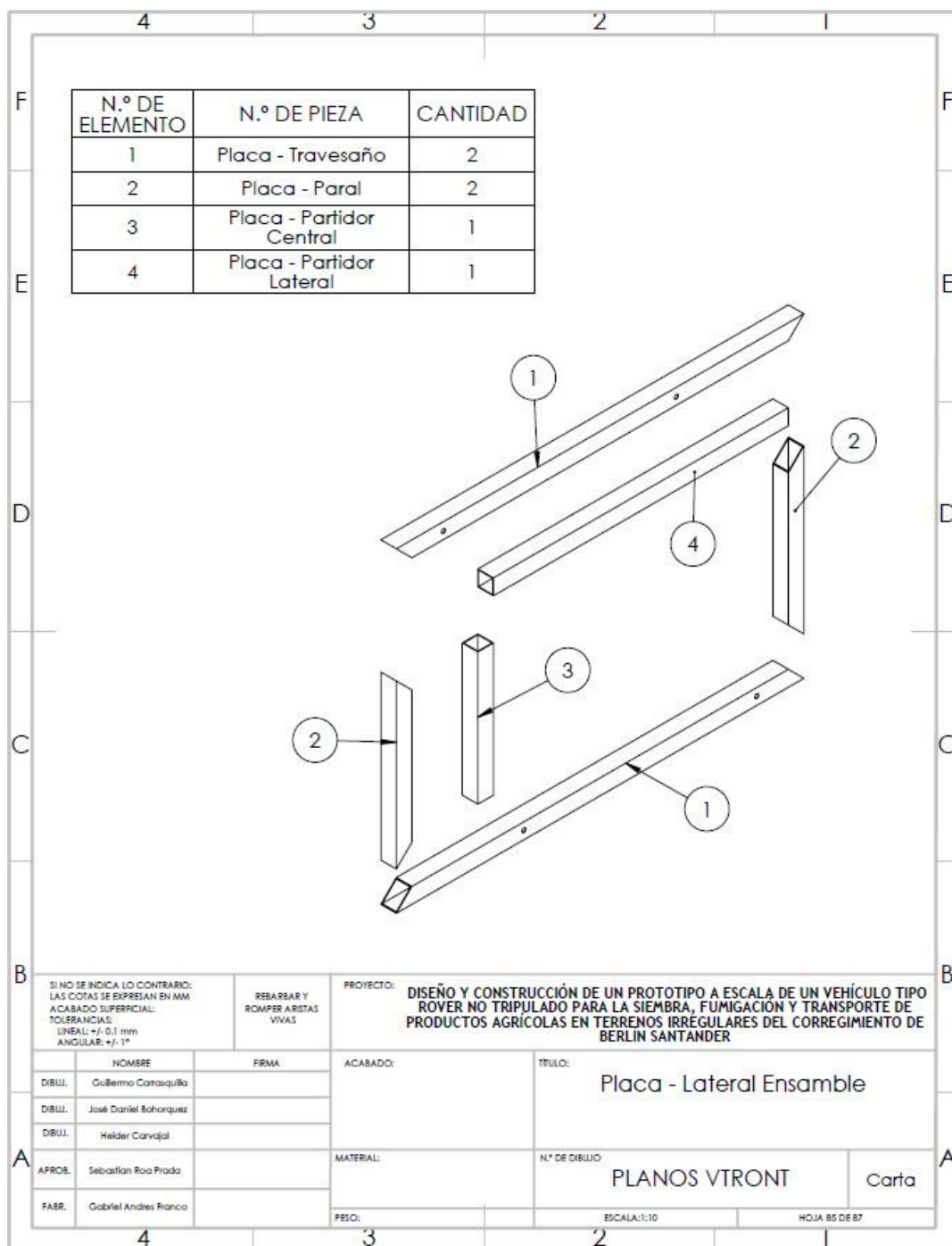


Ilustración 249 Plano vista explosionada de la parte lateral de la placa.

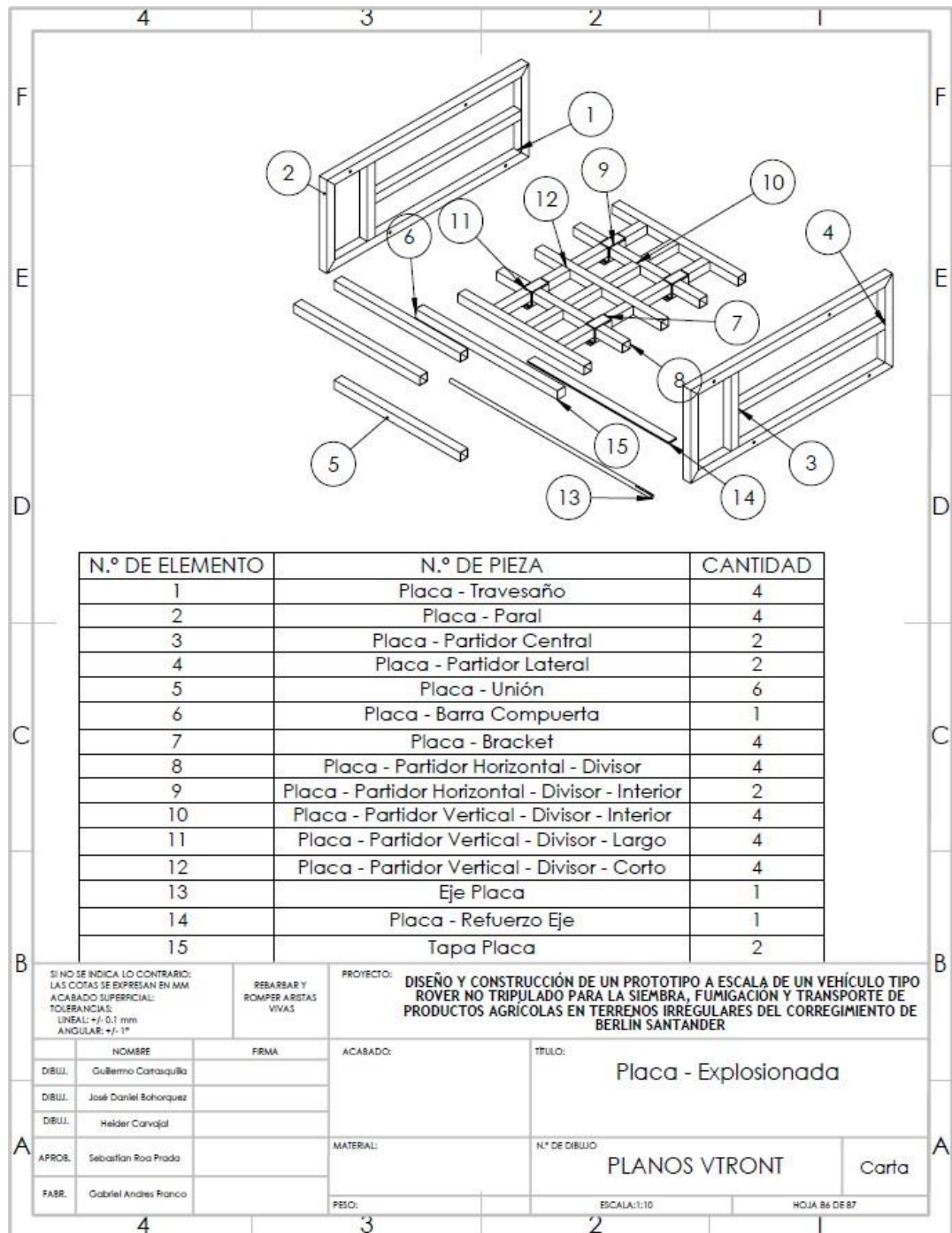


Ilustración 250 Plano vista explosionada de la placa con sus partes.

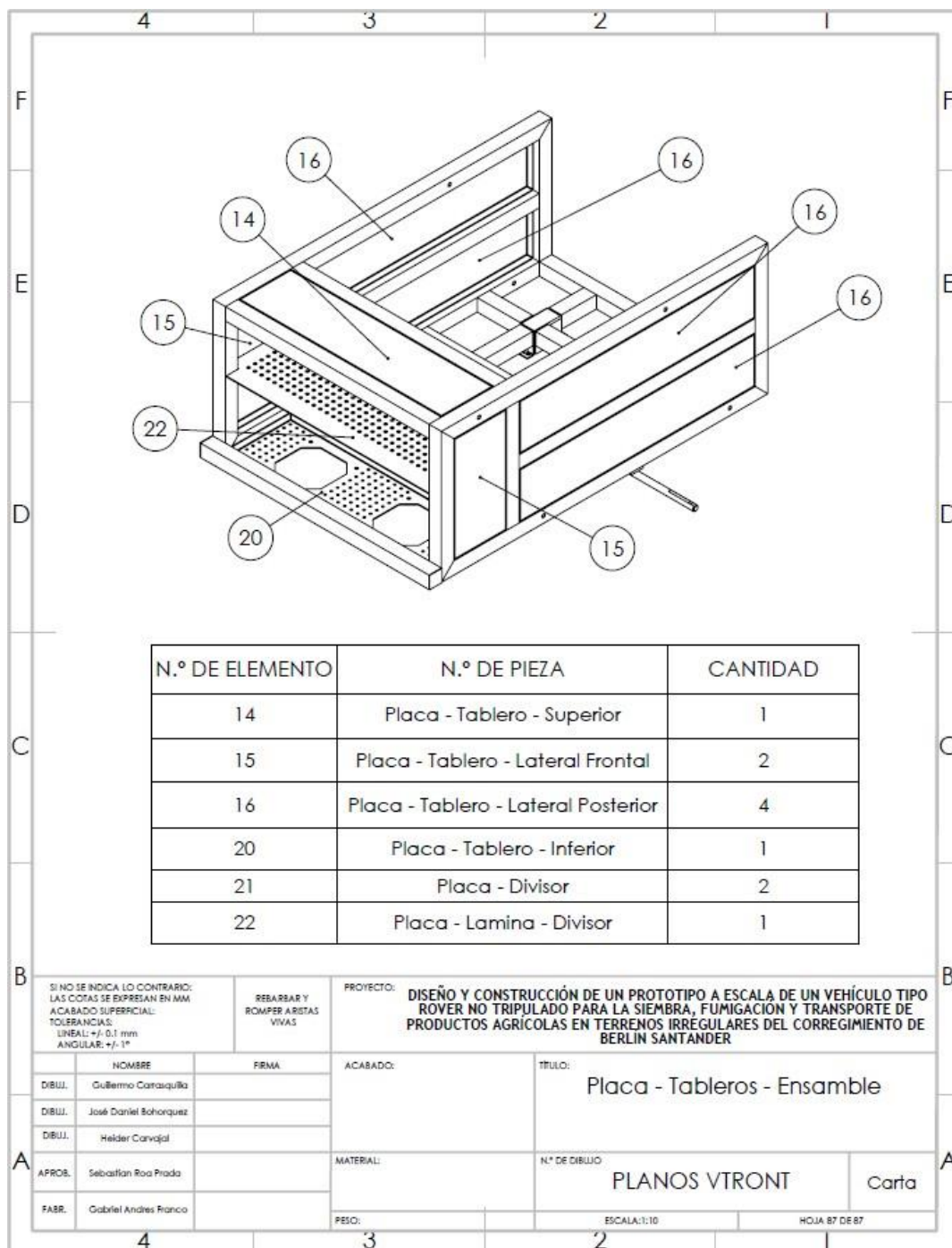
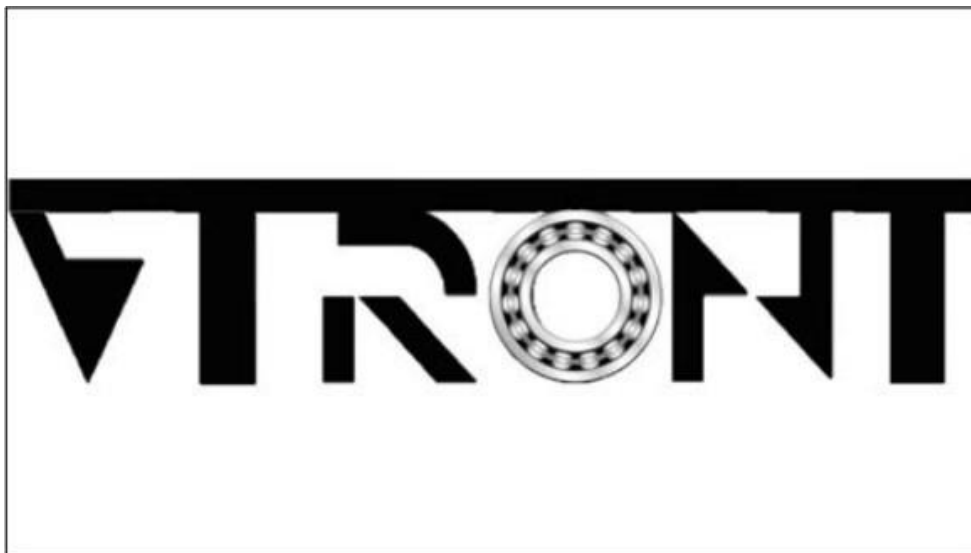


Ilustración 251 Planos de los tableros de la placa.

8.6. MANUAL DEL USUARIO

En el apartado a continuación se encontrará el manual de usuario completo, indicando así el uso correcto del vehículo y sus indicaciones.



MANUAL DEL USUARIO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE VEHÍCULO
TIPO ROVER NO TRIPULADO PARA LA SIEMBRA, FERTILIZACIÓN Y
TRANSPORTE DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS EN TERRENOS IRREGULARES
DEL CORREGIMIENTO DE BERLÍN SANTANDER

Versión: 1.1.0

Fecha: 17/11/2020

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	4
2. DESCRIPCIÓN	4
2.1 Características técnicas del vehículo	4
2.2 Características de la aplicación de control	4
3. MODOS DEL VEHICULO	5
3.1 Estado Inicial	5
3.2 Transporte	6
3.3 Siembra	7
3.4 Riego	9
3.5 Instalación del aplicativo móvil	10
4. FUNCIONAMIENTO	11
4.1 Descripción	11
4.1.1 Ventana 1 – Inicio	11
4.1.2 Ventana 2 – Comandos por botones	13
4.1.2.1 Conexión bluetooth 1	13
4.1.2.2 Botones avance y retroceso	14
4.1.2.3 Botón de detener	15
4.1.2.4 Barra de deslizamiento para el giro para el vehículo	15
4.1.2.5 Botón de inclinar placa	16
4.1.2.6 Botón de siembra	17
4.1.2.7 Ilustración de la sección de riego	18
4.1.2.8 Barra de deslizamiento para apertura de la válvula	18
4.1.3 Ventana 3 – Comandos por voz	19
4.1.3.1 Botón de control por voz:	19
4.1.3.2 Conexión Bluetooth 2	20
4.1.3.3 Estado de la orden	21
5. MANTENIMIENTO, SEGURIDADES Y RECOMENDACIONES	22
6. DIAGRAMAS DE CONEXIÓN	23
6.1 Diagrama de conexiones completo:	23
6.2 Conexiones para los servomotores:	24
6.3 Conexiones para el módulo Bluetooth y la MPU(Girosopio)	25
6.4 Conexiones para los drivers y Motorreductores:	26

1. INTRODUCCIÓN

A continuación, se presenta el manual del usuario del vehículo en donde se encontrará toda la información necesaria y referente al mismo para su correcto uso y funcionamiento, como también se encontrarán advertencias de casos que puedan llegar a presentarse al momento de su uso.

La buena lectura de este documento hará que se obtengan buenas bases de conocimientos generales del prototipo y evitar errores básicos al momento del uso del vehículo, ayudando a aprovechar al máximo sus funcionalidades sin afectarlo o averiarlo.

2. DESCRIPCIÓN

2.1 Características técnicas del vehículo

Las características generales del vehículo son:

- 2 modos de operación: Por botones o voz
- 3 funcionalidades base de cooperación en el cultivo:
 - Cooperación en el transporte de cargas de cebolla a la zona de arreglo en bultos.
 - Cooperación en la siembra de la semilla con capacidad de 12 semillas.
 - Cooperación en el riego de líquidos para la ayuda del crecimiento del cultivo.

2.2 Características de la aplicación de control

La aplicación de control es aquella que permitirá que el usuario controle el vehículo según este lo desee utilizar. Dicha aplicación posee tres ventanas generales.

- Inicio
- Control por botones
- Control por voz

La ventana de inicio es la interfaz de presentación, la cual aparece al iniciar el aplicativo móvil. Esta ventana posee unos botones que permiten transitar entre la modalidad de control que desee utilizar el usuario, ya sea por botones o por voz; estas ventanas son las que poseen los diferentes comandos que permitirán controlar el vehículo que se explicarán más a detalle en la sección de funcionamiento.

3. MODOS DEL VEHICULO

3.1 Estado Inicial

El estado inicial del vehículo es el modo de transporte sin la lámina, en donde el usuario lo encontrará de la siguiente manera para su inmediato funcionamiento:



Ilustración 1. Vehículo completo en estado inicial

IMPORTANTE: Todos los componentes respectivos para transitar entre modos afectan solamente a la placa base por tal razón se mostrará la siguiente imagen exceptuando el sistema del rocker bogie.

Estado inicial de la placa:



Ilustración 2. Placa en estado inicial

3.2 Transporte

Para este modo es necesario ubicar la lámina de transporte, con el objetivo de tapar los orificios diseñados para la parte de siembra. Con esto, ya es posible que el usuario pueda montar sobre la placa lo que necesite transportar en el momento. Ya teniendo el componente de este modo acoplado, diríjase al inciso 4 para proceder a usar la app y controlarlo.

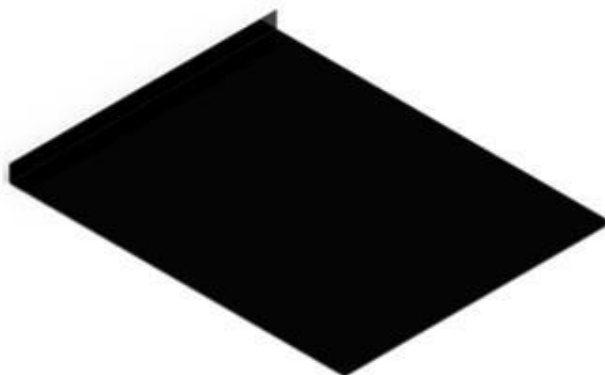


Ilustración 3. Lámina



Ilustración 4. Placa en modo transporte



Ilustración 5. Vehículo en modo transporte

Para cambiar o transitar a otro modo del vehículo, es necesario en la transición a la función de siembra y opcional en la función de riego, que se retire la lámina usada en este estado para dejar la placa nuevamente en estado inicial.

3.3 Siembra

Partiendo del estado inicial, entrar en este modo requiere:

- Presionar el botón "Inclinar placa" de la app para levantar la placa y esperar hasta que se posicione.
- Atornillar la tolva después de que se haya levantado la placa, usando los 4 tornillos para sujetarla en las 4 tuercas ubicadas en las partes laterales externas de la placa.

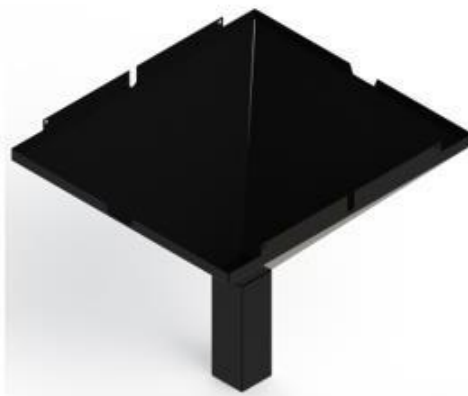


Ilustración 6. Tolva



Ilustración 7. Vehículo en modo siembra

Ya teniendo los componentes de este modo acoplados, dirijase al inciso 4 para proceder a usar la app y controlarlo. Para cambiar o transitar a otro modo del vehículo, es necesario retirar la tolva quitando los 4 tornillos que la aseguran y así, dejar la placa nuevamente en estado inicial.

3.4 Riego

Partiendo del estado inicial, entrar en este modo requiere:

- Conectar la manguera entre la espiga a la salida del sistema de riego debajo de la placa, con la espiga del servomotor de riego, que da a al lago externo de la placa.
- Llenar el tanque del líquido deseado para regar el cultivo y poner la lámina de transporte dentro de la placa.
- Inclinar un poco el tanque lleno del líquido para conectar una segunda manguera entre la salida del tanque y la espiga restante del servomotor, que da a la parte interna de la placa.
- Una vez las dos mangueras estén conectadas, se posiciona el tanque de tal manera que quede acostado sobre la lámina de transporte.
- Verificar que la siguiente pieza este conectada, de lo contrario use los dos tornillos M4 con sus tuercas para fijarlo a parte trasera de placa como se ve en la ilustración 6.



Ilustración 8. Servomotor y válvula



Ilustración 9. Vehículo en modo riego

Ya teniendo los componentes de este modo acoplados, dirijase el inciso 4 para proceder a usar la app y controlarlo. Para cambiar o transitar a otro modo del vehículo, es necesario cerrar la válvula de riego con la aplicación y retirar las mangueras descritas en los pasos anteriores. Por último, se retira el tanque y lamina de transporte para que la placa vuelva al estado inicial.

3.5 Instalación del aplicativo móvil

Para obtener la app y poder controlar el vehículo, es necesario leer el siguiente código QR.



Ilustración 10. Código QR de la App

Para leerlo, es necesario que su dispositivo móvil tenga un lector de códigos QR y acceso a internet para que pueda ver y descargar el archivo. Allí encontrará un archivo apk que corresponde al archivo de instalación de la app VTRONT, el cual procederá a instalar, para finalmente controlar el vehículo.

4. FUNCIONAMIENTO

4.1 Descripción

4.1.1 Ventana 1 – Inicio



Ilustración 11. Ventana de inicio

Esta es la interfaz inicial de la aplicación en donde como se mencionó anteriormente y que es en donde se puede evidenciar la presentación de la app.



Ilustración 12. Botones de la ventana 1

En la figura () se logran ver los botones que permiten transitar hacia las otras ventanas disponibles de la aplicación.

- Botón control de botones: Al pulsar este botón, el usuario será redirigido a la siguiente ventana:



Ilustración 13. Ventana de control por botones

- Botón control por voz: Al pulsar este botón, el usuario habrá elegido utilizar los comandos por voz y será redirigido a la siguiente ventana:



Ilustración 14. Ventana de control por voz.

4.1.2 Ventana 2 – Comandos por botones

4.1.2.1 Conexión bluetooth 1



Ilustración 15. Botón de conexión bluetooth 1

Inicialmente una vez el usuario este en esta ventana es de suma importancia que utilice este botón que es el de conexión bluetooth. Con dicho botón el usuario podrá conectar mediante bluetooth su teléfono y el controlador Arduino, lo cual permitirá que las ordenes se envíen mediante el teléfono, sean enviadas al controlador y este a su vez envíe las ordenes al vehículo.

4.1.2.2 Botones avance y retroceso



Ilustración 16. Botones de avance y retroceso

Empezando en el control del robot, tenemos por principio el control para el transporte del vehículo; en lo cual, se indican en esta ventana las flechas que cumplen la función del movimiento del vehículo.

4.1.2.3 Botón de detener



Ilustración 17. Botón de detener

Por otra parte, tenemos en esta ventana la indicación del botón que representa la acción de parar, y efectivamente representa esto mismo en las funciones que debe realizar el vehículo cuando el usuario presione este botón.

4.1.2.4 Barra de deslizamiento para el giro para el vehículo

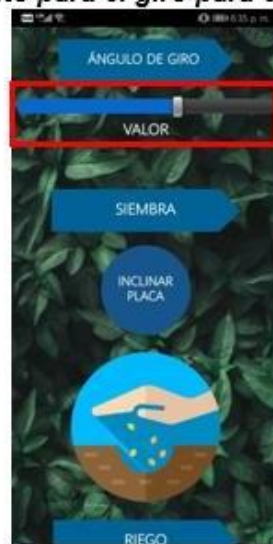


Ilustración 18. Barra de deslizamiento para el control de giro

Y, por último, para cumplir las acciones básicas del modo de transporte para nuestro robot, tenemos el ángulo de giro, en el cual el usuario mediante desplaza la slider presente en la aplicación, podrá visualizar el cambio que tendrá el vehículo para poder realizar curvas con este.

4.1.2.5 Botón de inclinar placa



Ilustración 19. Botón de inclinar placa

El botón de inclinar placa, será el que el usuario deberá usar para poder atornillar la tolva y pasar al modo de siembra. Este botón al ser presionado inclinará la placa para facilitar dicho proceso.

4.1.2.6 Botón de siembra



Ilustración 20. Botón de siembra

Siguiendo con el control que el usuario va a realizar sobre el vehículo, tenemos la fase de siembra, en la cual en esta ventana podemos ver un botón, el cual va a realizar la función de, cada vez que el usuario lo oprima, deje caer una semilla por la tolva al terreno. Esto siendo lo único que tendría que hacer el usuario, ya que, gracias a la tolva diseñada, caerá siempre en el mismo punto.

4.1.2.7 Ilustración de la sección de riego

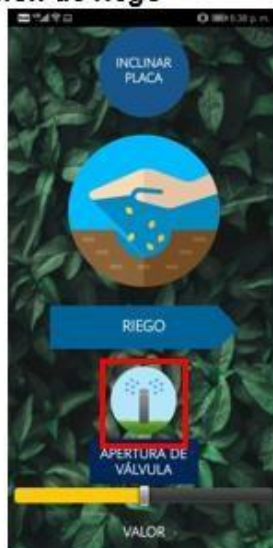


Ilustración 21. Ilustración de la función de riego

Por último, en la parte de control por botones, tenemos la fase de riego, para la cual, el usuario encontrara una imagen de riego, la cual tiene la intención de ilustrar esta fase de control.

4.1.2.8 Barra de deslizamiento para apertura de la válvula

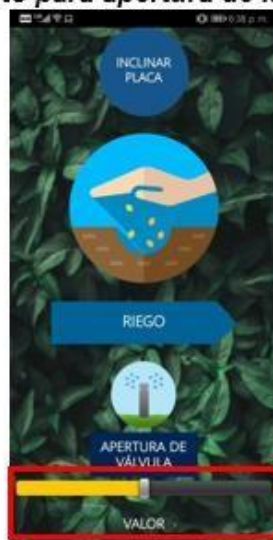


Ilustración 22. Barra de deslizamiento para el control de la válvula

Finalmente, lo último que el usuario encontrara en esta ventana es la apertura de válvula, la cual le permitirá modificar cuanto liquido desea que salga de la válvula y así poder regar sus cultivos.

4.1.3 Ventana 3 – Comandos por voz

4.1.3.1 Botón de control por voz:

Una vez se haya ingresado en la ventana de control por botones, aparecerá la siguiente interface, en donde inicialmente se podrá ver un botón con un micrófono el cual tendrá la función de recibir las ordenes por voz.

Para utilizarlo se debe presionar dicho botón, esperar a que se active el asistente de voz de Google y posteriormente decir los respectivos comandos para controlar el vehículo a gusto.



Ilustración 23. Botón de control por voz

Comandos por voz:

1. **Avanzar:** Con este comando el usuario podrá hacer que el vehículo se mueva hacia adelante.
2. **Retroceder:** Con este comando el usuario podrá hacer que el vehículo se mueva hacia atrás.

3. **Parar:** Teniendo en cuenta que los dos comandos anteriores no se detienen, es preciso utilizar este comando para detener el vehículo. Por ejemplo, si el usuario utiliza el comando de avanzar, el vehículo se moverá hacia delante hasta que el usuario diga el comando de parar.
4. **Sembrar:** Este comando lo podrá utilizar el usuario cuando el vehículo tenga puestos los complementos de siembra y lo que realizará el vehículo será el proceso de sembrado.
5. **Girar derecha:** Con este comando el vehículo empezará a girar sus ruedas hacia la derecha y funcionará de igual manera que los dos primeros comandos ya que cuando las ruedas lleguen a la posición deseada el usuario tendrá que utilizar el comando de parar para detener esta acción.
6. **Girar izquierda:** Este comando funciona de la misma manera que el comando anterior, pero movimiento los motores hacia la izquierda.
7. **Abrir válvula:** Con este comando el usuario podrá abrir la válvula de riego
8. **Cerrar válvula:** Con este comando el usuario podrá cerrar la válvula de riego

4.1.3.2 Conexión Bluetooth 2



Ilustración 24. Botón de conexión a bluetooth 2.

Este botón permitirá la conexión bluetooth entre el teléfono y el controlador Arduino como se explicaba en el caso de la ventana anterior.

RECORDAR: Es importante tener en cuenta que cada vez que se cambie de ventana, se tendrá que repetir este proceso, esto es, porque el módulo bluetooth se desconecta en cada uno de estos cambios.

4.1.3.3 Estado de la orden



Ilustración 25. Barra de estado

Esta sección no es un botón, es una barra de texto la cual se actualiza según la última orden dada al vehículo. Esta barra mostrará en forma de texto el comando que el usuario utilice, de ahí, que el usuario podrá verificar que la orden ha sido recibida y ejecutada.

5. MANTENIMIENTO, SEGURIDADES Y RECOMENDACIONES

- Mantener todo el sistema electrónico alejado del contacto con el agua para evitar daños en este.
- El peso máximo de transporte establecido es de 12.5 Kg, superar este valor puede ocasionar daños en el sistema electrónico como la pérdida de motores y demás componentes electrónicos.
- Evite conectar y desconectar componentes dentro del área frontal de la placa en donde se encuentran la parte de control del sistema electrónico.
- Para movilizar el prototipo es posible, por su tamaño, desmontar todo el vehículo en tres grandes partes; desconectando todos los acoples de los motores ubicados en las partes laterales de la placa y aflojando los prisioneros de las chumaceras que conectan la placa y los rockers.
- En caso de aflojarse alguno de los piñones de los servos de dirección, encima de las llantas, utilizar un destornillador para atesar el tornillo del centro del piñón del servomotor.
- Para transitar entre los modos de funcionamiento del vehículo, no olvidar retirar los componentes utilizados del modo actual, para dejar la placa en estado inicial y así transitar al siguiente modo.
- Cerciorarse de asegurar en cada uso toda la tornillería implementada en el vehículo, exclusivamente la de los motores para proteger los componentes y evitar daños.
- En caso de limpiar los componentes, hay que desconectar las baterías de sus puertos o en su defecto desconectar los acoples de los motores para evitar el contacto con sustancias.
- En caso de transportar manualmente el vehículo hacia algún lugar, apagar todos los sistemas para evitar daños a los motores y ahorrar la batería.

6.2 Conexiones servomotores:

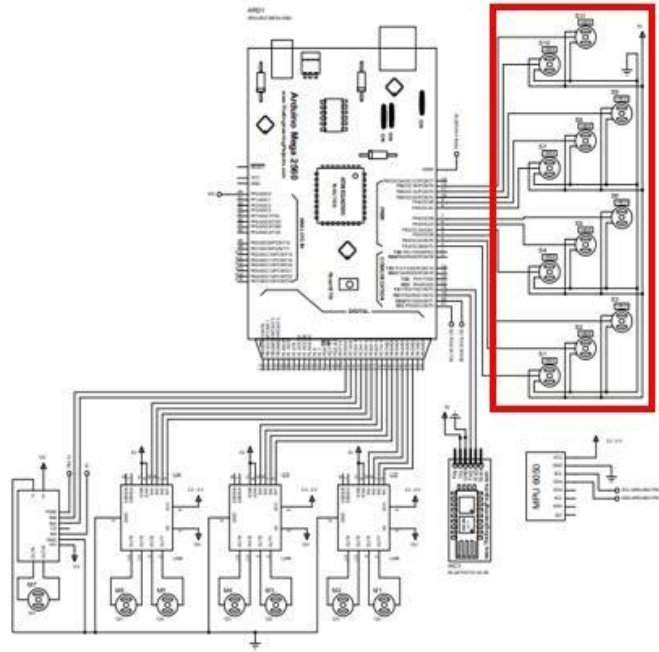


Ilustración 27. Sección de los servomotores

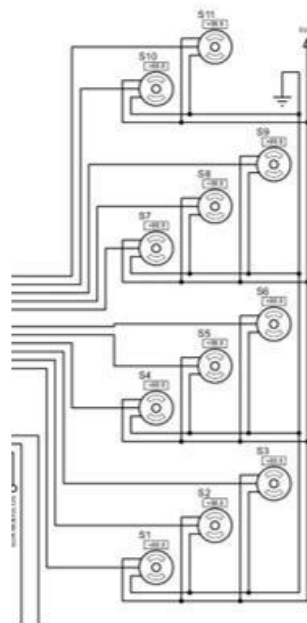


Ilustración 28 Servomotores

6.3 Conexiones módulo Bluetooth y MPU (Giroscopio)

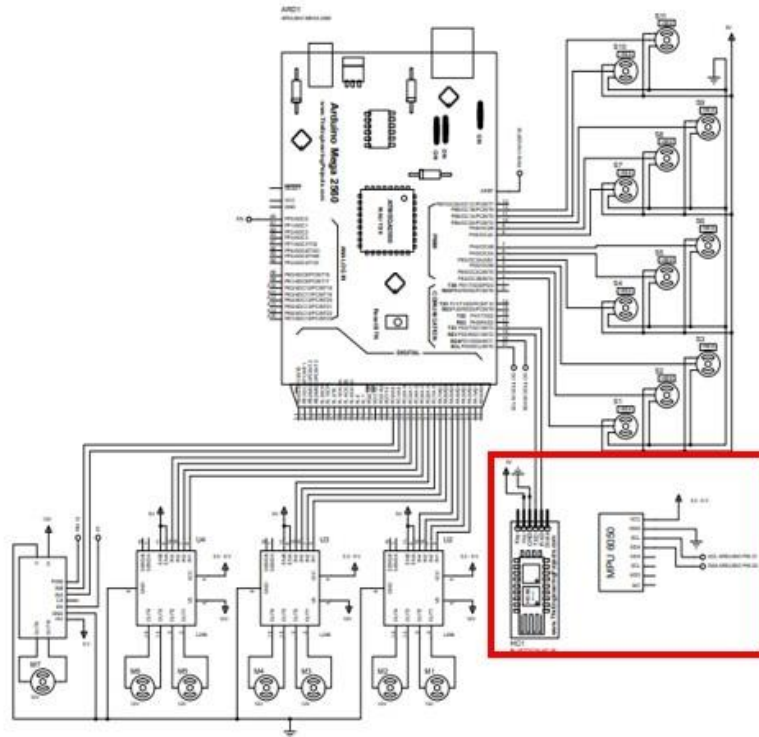


Ilustración 29. Sección de los módulos (Bluetooth y MPU)

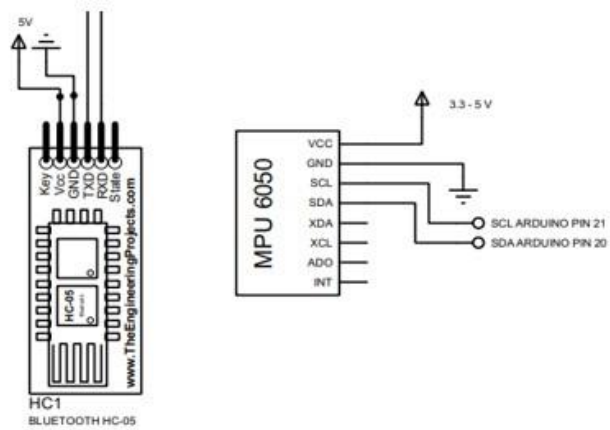


Ilustración 30 Módulos bluetooth y giroscopio

6.4 Conexiones drivers y Motorreductores:

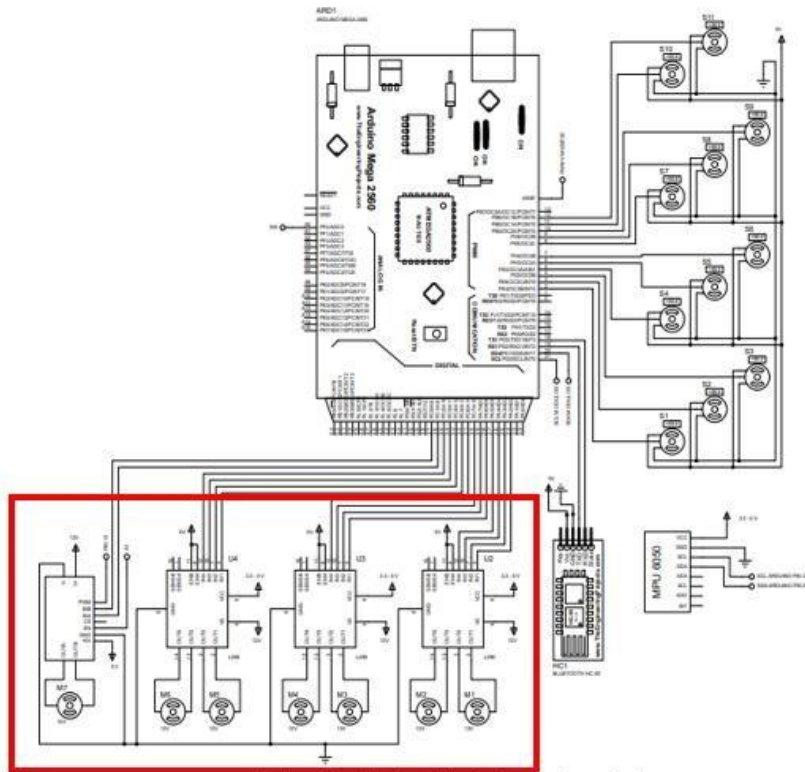


Ilustración 31. Sección de los motorreductores

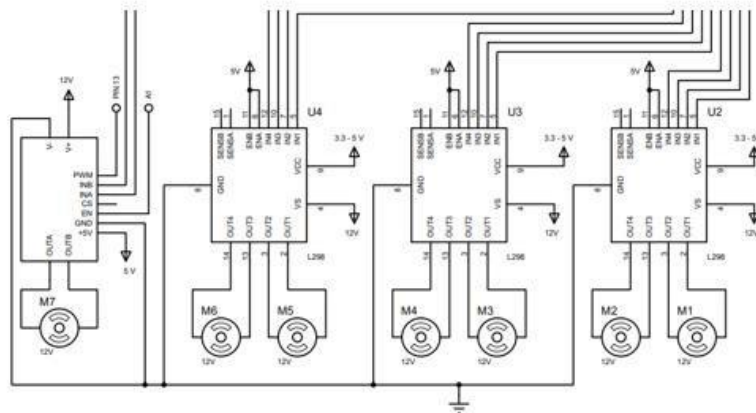


Ilustración 32. Drivers y Motorreductores