



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA MECÁNICA

**“MODELACIÓN MATEMÁTICA Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA
MECÁNICO DE UNA SILLA DE RUEDAS BIPEDESTADORA
USANDO EL MÉTODO DE BOND-GRAPH”**

Trabajo de integración curricular

Tipo: Proyecto técnico

Presentado para obtener el grado académico de:

INGENIERA MECÁNICA

AUTORA:

MICHELLE CRISTINA CAMACHO HEREDIA

Riobamba – Ecuador

2022



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA MECÁNICA

**“MODELACIÓN MATEMÁTICA Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA
MECÁNICO DE UNA SILLA DE RUEDAS BIPEDESTADORA
USANDO EL MÉTODO DE BOND-GRAPH”**

Trabajo de integración curricular

Tipo: Proyecto técnico

Presentado para obtener el grado académico de:

INGENIERA MECÁNICA

AUTORA: MICHELLE CRISTINA CAMACHO HEREDIA

DIRECTOR: Ing. SÓCRATES MIGUEL AQUINO ARROBA

Riobamba – Ecuador

2022

©2022, Michelle Cristina Camacho Heredia

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Michelle Cristina Camacho Heredia, declaro que el presente trabajo de integración curricular es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de integración curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 14 del febrero de 2022

A handwritten signature in blue ink, reading "Michelle Camacho". The signature is written in a cursive style with a large initial 'M'.

Michelle Cristina Camacho Heredia

160067811-2

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA MECÁNICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto técnico, “**MODELACIÓN MATEMÁTICA Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO DE UNA SILLA DE RUEDAS BIPEDESTADORA USANDO EL MÉTODO DE BOND-GRAPH**” realizado por la señorita **MICHELLE CRISTINA CAMACHO HEREDIA** , ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

FIRMA

FECHA

Ing. MSc. Edwin Fernando Viteri Núñez

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



2022-02-14

Ing. MSc. Sócrates Miguel Aquino Arroba

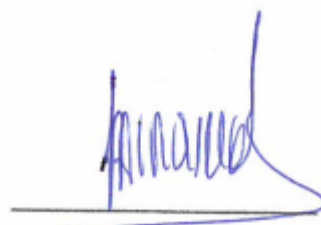
DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



2022-02-14

Ing. MSc. Geovanny Guillermo Novillo Andrade

MIEMBRO DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



2022-02-14

DEDICATORIA

A Dios que siempre estuvo en mi vida, mis padres y hermanos que estuvieron dándome ánimo y apoyo para salir adelante, mis tíos Tito, Rocio, Nely y Arturo que siempre se han preocupado por mí, a mi prima Vanessa que siempre tuvo fe en mí, mis amigas Enya y Estefanía que me han dado el apoyo que necesito y siempre están conmigo, mis amigos de carrera Cristian, Adolfo que estuvieron conmigo siempre dándome palabras de aliento.

Gracias por su confianza, cariño y dedicación que me ayudaron a crecer profesionalmente.

Michelle Cristina Camacho Heredia

AGRADECIMIENTO

A Dios que siempre estuvo en mi vida, mis padres y hermanos que estuvieron dándome ánimo y apoyo para salir adelante, mis tíos Tito, Rocio, Nely y Arturo que siempre se han preocupado por mí, a mi prima Vanessa que siempre tuvo fe en mí.

Un agradecimiento especial al Ing. Geovanny Novillo por ser un amigo, guía que comparte sus valiosos conocimientos y brindo su respaldo absoluto dentro del presente trabajo.

A mis amigas Enya y Estefanía que me han dado el apoyo que necesito y siempre están conmigo, mis amigos de carrera Cristian, Adolfo que estuvieron conmigo siempre dándome palabras de aliento. Gracias por su confianza, cariño y dedicación que me ayudaron a crecer profesionalmente.

Finalmente, a la ESPOCH y a los docentes de la carrera de Ingeniería Mecánica, por todo lo que me ha brindado y enseñado.

Michelle Camacho Heredia

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiiiv
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xvi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvii
RESUMEN.....	xviii
SUMMARY.....	xix
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1.	DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	2
1.1.	Antecedentes.....	2
1.2.	Delimitación.....	3
<i>1.2.1.</i>	<i>Delimitación espacial.....</i>	<i>3</i>
<i>1.2.2.</i>	<i>Delimitación sectorial.....</i>	<i>3</i>
1.3.	Formulación del problema.....	4
1.4.	Objetivos.....	4
<i>1.4.1.</i>	<i>Objetivo general.....</i>	<i>4</i>
<i>1.4.2.</i>	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>4</i>

CAPÍTULO II

2.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
2.1.	Bipedestación.....	5
2.2.	Equipos de bipedestación.....	5
2.3.	Silla de ruedas bipedestadora	8
2.3.1.	<i>Mecanismo de silla de ruedas bipedestadora</i>	8
2.3.2.	<i>Partes de la silla de ruedas bipedestadora</i>	10
2.4.	Modelado	11
2.5.	Método de Bond Graph	11
2.5.1.	<i>Bonds</i>	12
2.5.2.	<i>Orígenes del Bond-Graph</i>	13
2.5.3.	<i>Formulación de gráficos de unión</i>	15
2.5.4.	<i>Elementos básicos del Bond Graph.....</i>	16
2.5.4.1.	<i>Elementos fuente.....</i>	17
2.5.4.2.	<i>Elementos que almacenan energía.....</i>	17
2.5.4.3.	<i>Elementos de disipan energía.....</i>	18
2.5.4.4.	<i>Nodos de unión.....</i>	18
2.5.5.	<i>La causalidad</i>	22
2.5.6.	<i>Mecanismos en Bond-Graph</i>	25
2.6.	Simulación de mecanismos	25
2.6.1.	<i>Matlab / Simulink</i>	27
2.6.2.	<i>20-Sim.....</i>	28

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO.....	31
3.1.	Requerimientos funcionales	31
3.2.	Dimensiones.....	32
3.3.	<i>Componentes eléctricos</i>	33
3.3.1.	<i>Motores</i>	33
3.3.2.	<i>Actuador lineal</i>	34
3.3.3.	<i>Batería</i>.....	34
3.4.	Análisis del mecanismo	35
3.4.1.	<i>Puntos de interés para el análisis de Bond Graph</i>.....	37
3.4.2.	<i>Inercia mecánica</i>.....	38
3.4.3.	<i>Análisis dinámico</i>.....	40
3.4.3.1.	<i>Análisis de posición</i>.....	41
3.4.3.2.	<i>Análisis de velocidad</i>	43
3.4.3.3.	<i>Análisis de aceleraciones</i>.....	47
3.4.4.	<i>Análisis cinemático</i>.....	48
3.4.5.	<i>Análisis en plano inclinado</i>.....	50
3.5.	Bond Graph de la silla bipedestadora.....	51
3.5.1.	<i>MTF en 20- SIM</i>.....	52
3.5.2.	<i>Ruedas</i>.....	53
3.5.3.	<i>Actuador lineal</i>.....	57
3.5.4.	<i>Bond Graph para el brazo DG con respecto a la posición</i>.....	58
3.5.5.	<i>Bond Graph para el brazo PS con respecto a la posición</i>.....	60
3.5.6.	<i>Análisis por pasadores</i>.....	65
3.5.6.1.	<i>Pasador E</i>.....	67
3.5.6.2.	<i>Pasador F</i>.....	67
3.5.6.3.	<i>Pasador D</i>.....	68
3.5.6.4.	<i>Transformación de coordenadas</i>.....	68
3.5.6.5.	<i>Análisis de desplazamiento</i>.....	69

3.6.	Costos directos.....	70
-------------	-----------------------------	-----------

CAPÍTULO IV

4.	RESULTADOS.....	75
4.1.	Simulación en 20-sim	75
4.1.1.	<i>Subsistema cuerpo DG.....</i>	80
4.1.2.	<i>Subsistema cuerpo SE.....</i>	82
4.1.3.	<i>Subsistema cuerpo PS.....</i>	84
4.1.4.	<i>Análisis dinámico.....</i>	86
4.1.4.1.	<i>Posiciones</i>	86
4.1.4.2.	<i>Velocidades</i>	87
4.1.4.3.	<i>Aceleraciones</i>	88
	CONCLUSIONES.....	98
	RECOMENDACIONES.....	99
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Variables encontradas en los gráficos de bonds.....	12
Tabla 2-2:	Elementos básicos en el bond graph	16
Tabla 3-2:	Reglas de aplicación de la causalidad en bond-graph	23
Tabla 4-2:	Símbolos utilizados en la representación de puertos y sus ecuaciones.....	24
Tabla 1-3:	Parámetros de diseño	28
Tabla 2-3:	Parámetros dimensionales de referencia.....	29
Tabla 3-3:	Datos motor eléctrico.....	32
Tabla 4-3:	Datos actuador lineal	36
Tabla 5-3:	Elementos actuantes	36
Tabla 6-3:	Medidas del bipedestador	42
Tabla 7-3:	Posiciones gráficas.....	43
Tabla 8-3:	Velocidades del sistema.....	45
Tabla 9-3:	Costos.....	70
Tabla 1-4:	Datos del cuerpo DG.....	86
Tabla 2-4:	Datos del cuerpo SE.....	88
Tabla 3-4:	Datos del cuerpo PS.....	90
Tabla 4-4:	Resultados del modelo.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2:	Modelo de Gunnar	6
Figura 2-2:	Modelo de Kurt	8
Figura 3-2:	Modelo de Perk	8
Figura 4-2:	Silla de ruedas bipedestadora	9
Figura 5-2:	Mecanismo de silla de ruedas bipedestadora	10
Figura 6-2:	Representación gráfica del modelo de 4 barras de la silla bipedestadora...	10
Figura 7-2:	Análisis de movimiento de la silla de ruedas	11
Figura 8-2:	Silla de ruedas bipedestadora y sus partes	11
Figura 9-2:	Representación de un bond elemento-fuente	13
Figura 10-2:	Nomenclatura común en un gráfico de unión	16
Figura 11-2:	Fuente de esfuerzo	18
Figura 12-2:	Fuente de flujo	18
Figura 13-2:	Puerta rigidez.....	18
Figura 14-2:	Puerta inercia	18
Figura 15-2:	Puerta resistencia	19
Figura 16-2:	Nodos de unión	20
Figura 17-2:	Nodos de unión 0.....	20
Figura 18-2:	Representación de nodo de unión 0 y sus ecuaciones.....	20
Figura 19-2:	Nodo de unión 1.....	21
Figura 20-2:	Representación de nodo de unión 1 y sus ecuaciones	21
Figura 21-2:	Elementos transformer	22
Figura 22-2:	Elementos gyrator	23
Figura 23-2:	Causalidad integral (izquierda) y derivativa (derecha) para un elemento capacitivo.....	25
Figura 24-2:	Ejemplo de sistema modelado en 20-Sim.....	27
Figura 25-2:	Modelado y simulación en 20-sim.....	28
Figura 1-3:	Esquema simplificado del mecanismo bipedestador.....	28
Figura 2-3:	Dimensiones generales.....	30
Figura 3-3:	Árbol del mecanismo simplificado.....	31
Figura 4-3:	Mecanismo principal analizar.....	32
Figura 5-3:	Representación de la silla de ruedas a desarrollar con los componentes eléctricos.....	36

Figura 6-3:	Esquema simplificado de los puntos para analizar mediante Bond Graph	36
Figura 7-3:	Esquema de velocidades y ángulos analizar	37
Figura 8-3:	Esquema de fuerzas existentes	37
Figura 9-3:	Inercias del sistema	39
Figura 10-3:	Elementos del sistema silla de ruedas bipedestadora	40
Figura 11-3:	Análisis de posición método gráfico	42
Figura 12-3:	Análisis de posición	43
Figura 13-3:	Velocidades del lazo 1	44
Figura 14-3:	Análisis de velocidades del lazo 2 del mecanismo	46
Figura 15-3:	Análisis de aceleraciones	47
Figura 16-3:	Esquema para el desplazamiento	49
Figura 17-3:	Esquema para un plano inclinado	50
Figura 18-3:	Esquema del controlador en cascada	52
Figura 19-3:	Diagrama de una rueda y sus fuerzas	52
Figura 20-3:	Representación del motor en la rueda de la silla de ruedas	53
Figura 21-3:	Modelo de una rueda	53
Figura 22-3:	Bond Graph para la rueda	54
Figura 23-3:	Representación del actuador lineal para el análisis de Bond Graph	55
Figura 24-3:	Representación de los elementos del actuador lineal en Bond Graph	56
Figura 25-3:	Esquema del controlador en cascada	57
Figura 26-3:	Eslabón del brazo DG	57
Figura 27-3:	Esquema traslacional del brazo DG en 20-SIM	58
Figura 28-3:	Esquema del brazo DG	59
Figura 29-3:	Bond Graph posición DE y DG	60
Figura 30-3:	Eslabón del brazo PS	61
Figura 31-3:	Esquema del brazo PS en 20-SIM	62
Figura 32-3:	Esquema del brazo PS	63
Figura 33-3:	Bond Graph del brazo PS con respecto a DE	63
Figura 34-3:	Bond Graph de posiciones del sistema de silla bipedestadora	64
Figura 35-3:	Lazo del mecanismo analizar (Lazo 2)	66
Figura 36-3:	Pasadores de análisis	66
Figura 37-3:	Bond Graph para el pasador E	67
Figura 38-3:	Bond Graph para el pasador F	67
Figura 39-3:	Bond Graph para el pasador D	68
Figura 40-3:	Bond Graph para transformación de coordenadas	68

Figura 41-3:	Bond Graph para el desplazamiento del lazo 2.....	69
Figura 42-3:	Bond Graph general del modelo de 4 barras.....	71
Figura 43-3:	Submodelo cuerpo DG	72
Figura 44-3:	Submodelo cuerpo PS.....	73
Figura 45-3:	Submodelo cuerpo SE.....	74
Figura 1-4:	Cuerpo original del sistema de la silla de ruedas	75
Figura 2-4:	Bond Graph general de la silla de ruedas.....	76
Figura 3-4:	Bond Graph general de la velocidad angular.....	84
Figura 4-4:	Ingreso de parámetros para la velocidad angular	85
Figura 5-4:	Valores iniciales para Bond Graph de silla de ruedas bipedestadora.....	85
Figura 6-4:	Configuración puertos de salida cuerpo DG.....	86
Figura 7-4:	Configuración puertos de señal cuerpo DG.....	87
Figura 8-4:	Subsistema del cuerpo DG	88
Figura 9-4:	Configuración puertos de señal del cuerpo SE.....	89
Figura 10-4:	Subsistema del cuerpo SE.....	90
Figura 11-4:	Configuración puertos de señal del cuerpo PS.....	91
Figura 12-4:	Subsistema del cuerpo PS.....	92

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 1-4:	Variación de posición brazo DE vs tiempo 20-Sim	93
Gráfica 2-4:	Variación de posición pin F vs tiempo 20-Sim	93
Gráfica 3-4:	Variación de posición pin G vs tiempo 20-Sim	94
Gráfica 4-4:	Variación de velocidad pin G vs tiempo 20-Sim	95
Gráfica 5-4:	Variación de velocidad pin F vs tiempo 20-Sim	95
Gráfica 6-4:	Variación de aceleración pin F vs tiempo 20-Sim	97
Gráfica 7-4:	Variación de aceleración pin G vs tiempo 20-Sim	97

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Elementos de Bond Graph

ANEXO B: Simplificación de fuentes de esfuerzo

ANEXO C: Sistema físico primitivo e inercias

ANEXO D: Reglas del Bond Graph

RESUMEN

El presente proyecto tuvo como objetivo definir un modelo matemático y realizar la simulación del sistema mecánico de una silla de ruedas bipedestadora empleando el método Bond – Graph; tomando como posiciones críticas de análisis: la sedente (silla) y la bipedestación (erguida). El proceso de simulación partió de la definición de los parámetros dimensionales para cada elemento de la silla según lo indicado en la norma ISO 21542: 2012 y se estableció los parámetros de funcionamiento de los componentes eléctricos, para el motor eléctrico se designó una velocidad nominal de 70 RPM considerando que la traslación de la persona se realiza desde el reposo en un plano horizontal e inclinado; mientras que, para el actuador se consideró como etapa crítica la sedestación y se definió un empuje de 1500 N. Luego, se realizó un análisis dinámico, estático, de velocidad y aceleración para cada componente del sistema, y se definió cargas críticas, velocidades angulares, inercias y puntos de interés para la simulación, en donde aplicando el método de Bond Graph, se definió el modelo matemático que rige el movimiento de cada elemento del mecanismo y se obtuvo las curvas de variación para la posición y el desplazamiento de la silla bipedestadora. Estas, mostraron que se alcanza una altura de 1,15 m y se mantiene verticalidad durante el movimiento, lo cual de forma física garantiza el desplazamiento libre y seguro del usuario cuando este realice un cambio de posición de sedente a bípedo. Se concluye que el método Bond Graph permite el control directo de los parámetros de movilidad (velocidad, aceleración) a través de la variación de parámetros externos (masa, inercia, ángulos) para obtener un movimiento traslacional y rotacional del cuerpo. Finalmente, se recomienda emplear programas software con interfaces gráficas fáciles de interpretar y que permitan una mejor simulación del modelo general.

Palabras clave: <MODELO MATEMÁTICO >, <SILLA BIPEDESTADORA >, < MÉTODO BOND GRAPH >, < SEDENTE >, <BIPEDESTACIÓN>

RESUME

The objective of this project was to define a mathematical model and perform the simulation of the mechanical system of a standing wheelchair using the Bond - Graph method; taking as critical positions of analysis: seated (chair) and standing (upright). The simulation process started from the definition of the dimensional parameters for each element of the chair as indicated in the ISO 21542: 2012 Standard and the operating parameters of the electrical components were established, for the electric motor a nominal speed of 70 RPM considering that the translation of the person is carried out from rest in a horizontal and inclined plane; while, for the actuator, seated position was considered a critical stage and a thrust of 1500 N was defined. Then, a dynamic, static, velocity and acceleration analysis was carried out for each component of the system, and critical loads, angular velocities were defined, inertia and points of interest for the simulation; where applying the Bon Graph method, the mathematical model that governs the movement of each element of the mechanism was defined and the variation curves for the position and displacement of the standing chair were obtained. These showed that a height of 1.15 m is reached, and verticality is maintained during the movement, which physically guarantees the free and safe movement of the user when he changes position from seated to bipedal. It is concluded that the Bond Graph method allows the direct control of the mobility parameters (velocity, acceleration) through the variation of external parameters (mass, inertia, angles) to obtain a translational and rotational movement of the body. Finally, it is recommended to use software programs with graphical interfaces that are easy to interpret and that allow a better simulation of the general model.

Keywords: <MATHEMATICAL MODEL> <MECHANICAL SYSTEM> <STANDING CHAIR> <BOND GRAPH METHOD> <STANDING>.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de los modelos son construidos para obtener una mejor idea del comportamiento dinámico de toda clase de sistemas reales en nuestro entorno, sin embargo, es común que se cometa errores relacionados a extrapolaciones del modelo conllevando a abstracciones de este. Para lograr representar y simular estos modelos dinámicos con sus abstracciones se requiere no solamente ecuaciones matemáticas sino también una notación gráfica, para lo cual se utiliza algunos métodos, entre ellos el denominado método de Bond Graph (BG). Este método es un diagrama de grafico en el cual existen dos tipos de extremos denominados enlaces (bonds) los cuales están conectados a puertos (ports) y están encargados de especificar la transferencia de energía entre los componentes del sistema. Mediante la técnica de Bond Graph, un sistema físico puede ser modelado mediante elementos que tienen la propiedad de generación, almacenamiento, disipación y transformación de la energía. Este diagrama ofrece una visión global del sistema y de su estructura física. Además, tras su extensión “causal”, el BG también ofrece su estructura computacional y revela los posibles problemas matemáticos de su simulación. Todo el sistema resulta abierto y accesible, a diferencia de los métodos clásicos de estudio. Una ventaja adicional del método de BG radica en la facilidad de ensamblaje de sub-modelos o componentes particulares en el modelo general, sin tener que preocuparse de la generación de las ecuaciones adicionales que resultaría tremendamente ardua por métodos clásicos (Romero Rey 2005).

Se requiere introducir nuevos métodos de modelación matemática de sistemas mecánicos, es así que existen muchas técnicas para su modelación de los sistemas físicos se caracterizan por el intercambio de energía entre subsistemas. El lenguaje gráfico Bond Graph es una herramienta para obtener modelos matemáticos a partir de dicho intercambio, representando de manera unificada el flujo de potencia instantánea, los fenómenos de transformación, almacenamiento y disipación de energía y las relaciones estructurales.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

Según la Organización Mundial de Salud (OMS) alrededor de mil millones de personas a nivel mundial sufren de algún tipo de discapacidad, este índice va en aumento, esto se debe a factores como el envejecimiento de la población, el aumento de enfermedades crónicas del tipo hereditario. Las personas con discapacidad en edad de trabajar registran tasas de empleo considerablemente menores a las personas sin discapacidad, esto se debe a que una persona con discapacidad necesita un ambiente propicio para el desarrollo de una actividad laboral; según la OMS indica que las tasas de empleo son más bajas para los hombres con discapacidad (53%) y las mujeres con discapacidad (20%) que para los hombres sin discapacidad (65%) y las mujeres sin discapacidad (30%) (Organización Mundial de la Salud 2011).

En América Latina, el 80% de los discapacitados están desempleados o no integrados a una fuerza laboral, haciendo que un discapacitado no sea autosuficiente y tenga que buscar ayuda en los demás, influye en la pobreza y así como en el no desarrollo propio.

Uno de los problemas que presentan las personas con discapacidad es la accesibilidad debido a que no tienen medios físicos para acceder a las diferentes edificaciones, en la actualidad existen recursos mecánicos ayudando a que la accesibilidad de una persona sea independiente (Telégrafo 2017).

Según la Organización Mundial de la Salud, en Ecuador 511.277 poseen algún tipo de discapacidad, el 45,84% física, el 23% intelectual, el 14,13% auditiva, el 11,85% visual y el 1,33% de lenguaje. Evidentemente la discapacidad física presenta mayor número de casos registrados los cuales han sido recopilados por el Ministerio de Salud Pública. La silla de ruedas se ha convertido en una importante ayuda técnica para estos pacientes, que beneficia el movimiento, aunque depende de otras personas para realizar actividades que parecen normales como alcanzar algún objeto en una estantería o simplemente conversar con alguien a la misma altura (Ministerio de Salud Pública 2015).

La mayoría de modelos son construidos dándonos una mejor idea del comportamiento dinámico de los sistemas reales en nuestro entorno, para representar y simular estos modelos dinámicos no se requiere solo de ecuaciones matemáticas sino también de notación gráfica.

La técnica de Bond-Graph es un diagrama gráfico en el que existen extremos denominados enlaces los que están conectados a puertos y se encargan de especificar la transferencia de energía de los componentes, un sistema físico puede ser modelado basándose en elementos que tienen la

propiedad de generación, almacenamiento, disipación y transformación de la energía, ofreciendo una visión global del sistema y su estructura física, nos ayuda a revelar posibles errores de su simulación (Romero Rey 2005).

1.2. Delimitación

1.2.1. Delimitación espacial

El presente trabajo se desarrollará en la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo, Ecuador.

1.2.2. Delimitación sectorial

El estudio y desarrollo de este trabajo se acoge al Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021, en base al objetivo 1 el cual indica: Garantizar una vida digna con iguales oportunidades para todas las personas.

1.3. Formulación del problema

Se requiere introducir nuevos métodos de modelación matemática de sistemas mecánicos, es así que existen muchas técnicas para su modelación de los sistemas físicos se caracterizan por el intercambio de energía entre subsistemas. El lenguaje gráfico Bond Graph es una herramienta para obtener modelos matemáticos a partir de dicho intercambio, representando de manera unificada el flujo de potencia instantánea, los fenómenos de transformación, almacenamiento y disipación de energía y las relaciones estructurales.

Hay que introducir datos geométricos (medidas del modelo) y parámetros físicos para evidenciar el comportamiento del sistema mediante simulación. Se puede observar que el uso de este método es de mucha utilidad en todos los campos, especialmente en el campo de sistemas mecánicos dinámicos, relaciona la parte de modelación matemática y la ingeniería. A nivel nacional no se ha fomentado su implementación, es así que se podría utilizar este tipo de simulaciones.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Modelar matemáticamente y simular el sistema mecánico de una silla de ruedas bipedestadora usando el método de Bond Graph

1.4.2. Objetivos específicos

- Describir la teoría de Bond Graph para la modelación de sistemas en mecánicos.
- Aplicar la técnica de Bond Graph para la modelación matemática del sistema mecánico de una silla de ruedas bipedestadora propuesta.
- Realizar la simulación mediante Bond Graph.
- Validar el modelo matemático mediante 20-Sim
- Analizar los resultados de la simulación del sistema mecánico de la silla de ruedas bipedestadora propuesta.

CAPÍTULO II

2.FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Bipedestación

La postura erecta o estabilidad postural en bipedestación de los humanos es una característica de la evolución que se adquiere gracias al sentido que tiene el cuerpo humano de la situación en el espacio o al equilibrio. El mantenimiento de esta postura se logra mediante una adaptación adecuada de los músculos del cuello, tronco y miembros que actúan para mantener el cuerpo en una posición de equilibrio estable (Camargo , Esperanza ; Luengas , Lely ; Sánchez 2013).

No obstante, anatómicamente el cuerpo humano posee varias modificaciones entre las principales para la bipedestación se tiene; en la columna vertebral, pelvis, fémur, tibia y en los huesos de los pies que le permiten una locomoción bípeda (Delgado Bonilla 2009). Es considerada como una discapacidad que el ser humano no se encuentre de pie, esto viene a dar por causas musculoesqueléticas, considerando así que se encuentren demasiado tiempo sentadas en una silla de ruedas o a su vez en cama (Paredes, Erika; Toapanta 2018).

La productividad de considerar esta información motriz radica en la definición del comportamiento de las articulaciones de los miembros inferiores para favorecer a localizar las patologías presentes en la posición de bipedestación estática en este grupo de personas discapacitadas, además de dar una aproximación del comportamiento de los rangos articulares cuando una persona sufre de amputación transtibial (Yu, E; Abe, M; Masani, K; Kawashima, N; Eto, F; Haga, N; Nakazawa 2008).

2.2. Equipos de bipedestación

Con el desarrollo de la tecnología se han presentado una gran variedad de bipedestadores tales como posición supina o ventrales, en prono o dorsales. La posición supina (posición corporal acostado boca arriba) y prono son instancias intermedias que permiten al individuo acercarse a la posición de verticalidad, de tal manera que tanto la estructura ósea como muscular vayan asumiendo paulatinamente la posición vertical, Con esto el cuerpo humano por su propio peso va tomando conciencia de la posición de sí mismo en el espacio. Los bipedestadores pueden ser estáticos, móviles y/o dinámicos, los que pueden pasar de sedestación a bipedestación con fácil movilidad (Morillo 2014).

Actualmente, se pueden encontrar varios productos que ayudan a la movilización y bipedestación de pacientes con discapacidad motora inferior, los cuales se utilizan para trabajos de fisioterapia, movilización de pacientes, o para aprovechar los beneficios de la posición erguida del ser humano

(Vernaza, Mateo; Andagoya, Erick; Quimbiulco, David; Parra 2018). Se detallan en el mercado diferentes configuraciones de bipedestadores que van desde rústicos dispositivos que ayudan únicamente al usuario a estar de pie, hasta modernos sistemas electrónicos con costos muy elevados. Las tipologías encontradas en el mercado ecuatoriano y tanto a nivel internacional, se especifican por poseer grandes distancias conceptuales de ingeniería y funcionalidad, aquí encontramos diferentes modelos de bipedestadores para los diferentes niveles de discapacidad física en miembros inferiores, estos artefactos ingenieriles no reflejan realmente el perfil psicológico de las personas discapacitadas en el Ecuador, y más aún cuando se trata de una discapacidad como es la paraplejía (Morillo 2014).

Se indicará algunos equipos de bipedestación que han evolucionado con el paso de los años:

En 1999 Liljedahl Gunnar, presentó el diseño de un sistema de ayuda a las personas con discapacidad para ponerse de pie. Esta invención consiste en una grúa de elevación móvil que levanta al paciente desde su silla hasta la posición de pie con un arnés tipo onda a la altura de las axilas (Saavedra, García ; San Antonio 2013).

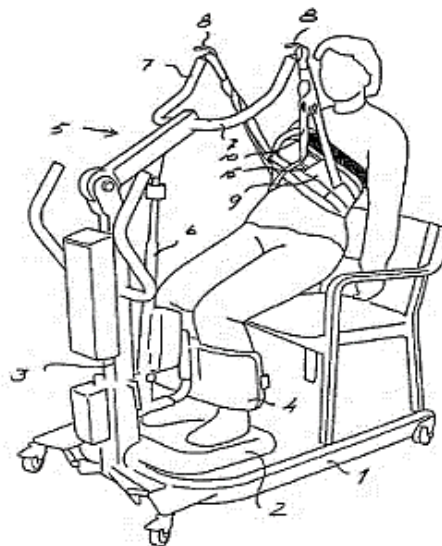


Figura 1-2. Modelo de Gunnar

Fuente: Saavedra, García ;San Antonio 2013

En 2009 Hunzikier Kurt , diseñó un prototipo de una silla para terapias de rehabilitación y reeducación física de acción hidráulica y mecanismo de paralelogramo, que permite llevar al paciente de posición sentado a de pie (Saavedra, García ;San Antonio 2013).

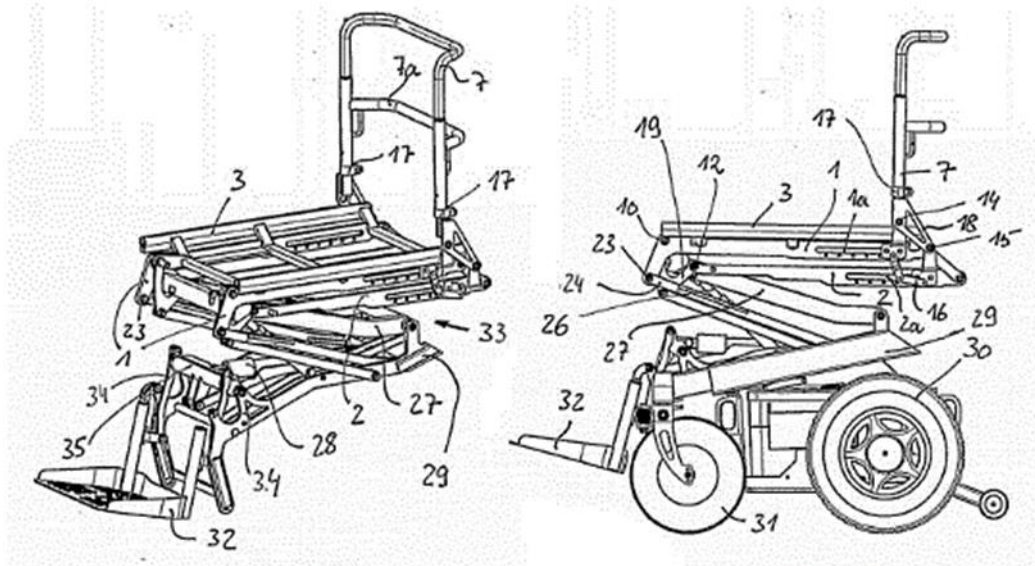


Figura 2-2. Modelo de Kurt

Fuente: Saavedra, García ; San Antonio 2013

En 2009 Perk Heinrich, presentó el diseño de un dispositivo ajustable a una silla de ruedas, para bipedestación que comprende un mecanismo de paralelogramo provisto de un asiento y un respaldo anclados al mecanismo motriz y un actuador dispuesto desde la base hasta la articulación del respaldo. El asiento provee el empuje necesario para mover la silla y en el armazón de la silla de rueda el mecanismo de paralelogramo para ajustar según se requiera (Saavedra, García ; San Antonio 2013).

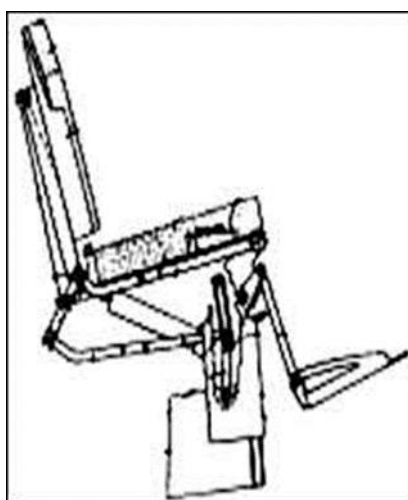


Figura 3-2. Modelo de Perk

Fuente: Saavedra, García ; San Antonio 2013

2.3. Silla de ruedas bipedestadora

Es el tipo de silla que permite al paciente levantarse en forma de bipedestación. Entendiéndose por bipedestación la posición en la que el cuerpo se encuentra erguido y en nuestro caso apoyado por correas, respaldo, reposapiés y reposabrazos que facilitan esta posición. La silla de ruedas bipedestadora puede ser de tipo manual o eléctrica en su desplazamiento y un actuador para conseguir la bipedestación (Wiereszen 2005).

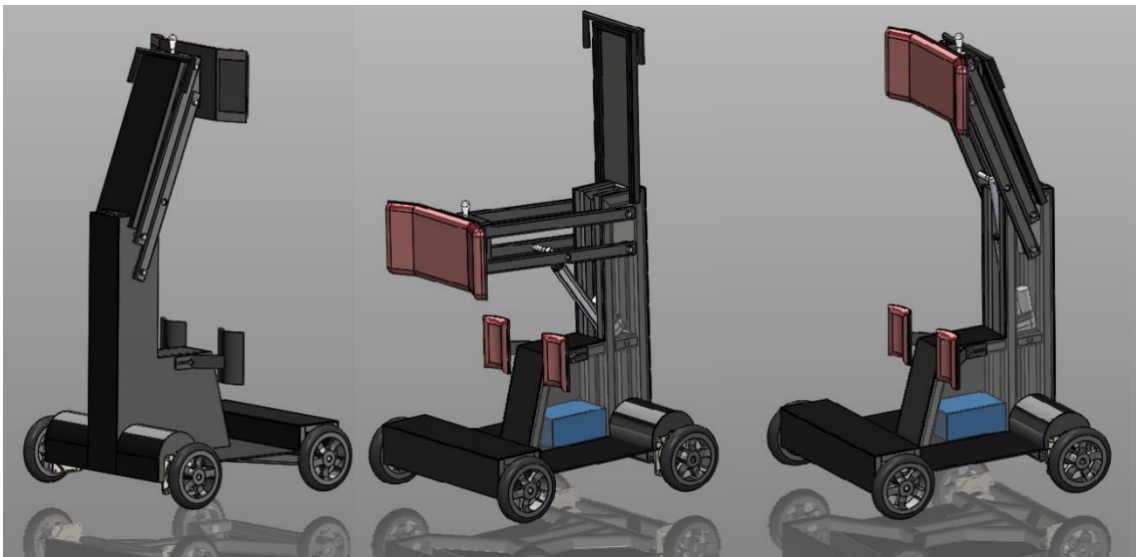


Figura 4-2. Silla de ruedas bipedestadora

Fuente: Herrera 2020

2.3.1. Mecanismo de silla de ruedas bipedestadora

El mecanismo principal funcionó de acuerdo a las especificaciones y los requerimientos de movilidad. Se emplean mecanismos de cuatro barras para simular el movimiento del cuerpo humano al ponerse de pie, es una solución simple y de ella se derivan muchos de los modelos comerciales actuales. Una vez comprobada la funcionalidad del mecanismo se proponen diseños que puedan satisfacer las necesidades y restricciones del problema, para ello como primer paso, se construyó un modelo a escala con el fin de realizar pruebas encaminadas a detectar problemas en la interacción entre los componentes móviles (Saavedra, García ;San Antonio 2013).

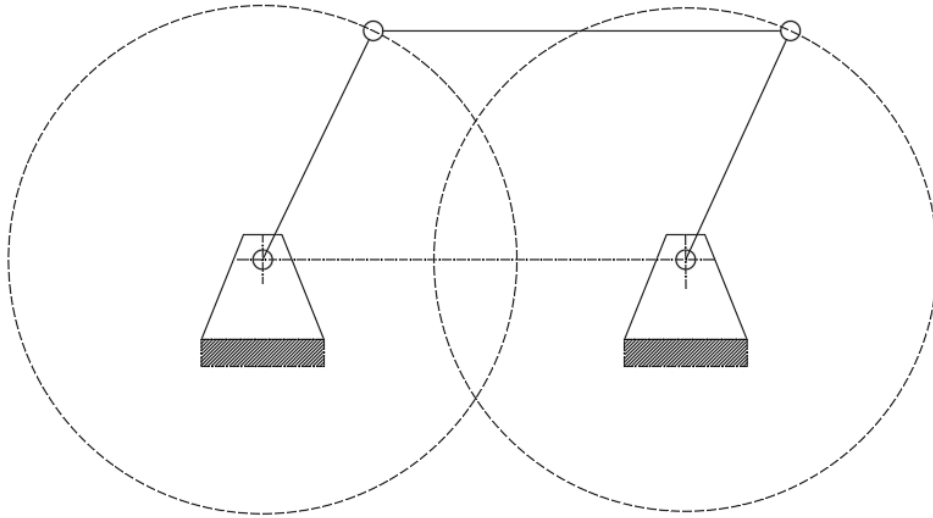


Figura 5-2. Mecanismo de silla de ruedas bipedestadora

Realizado por: Camacho Michelle 2022

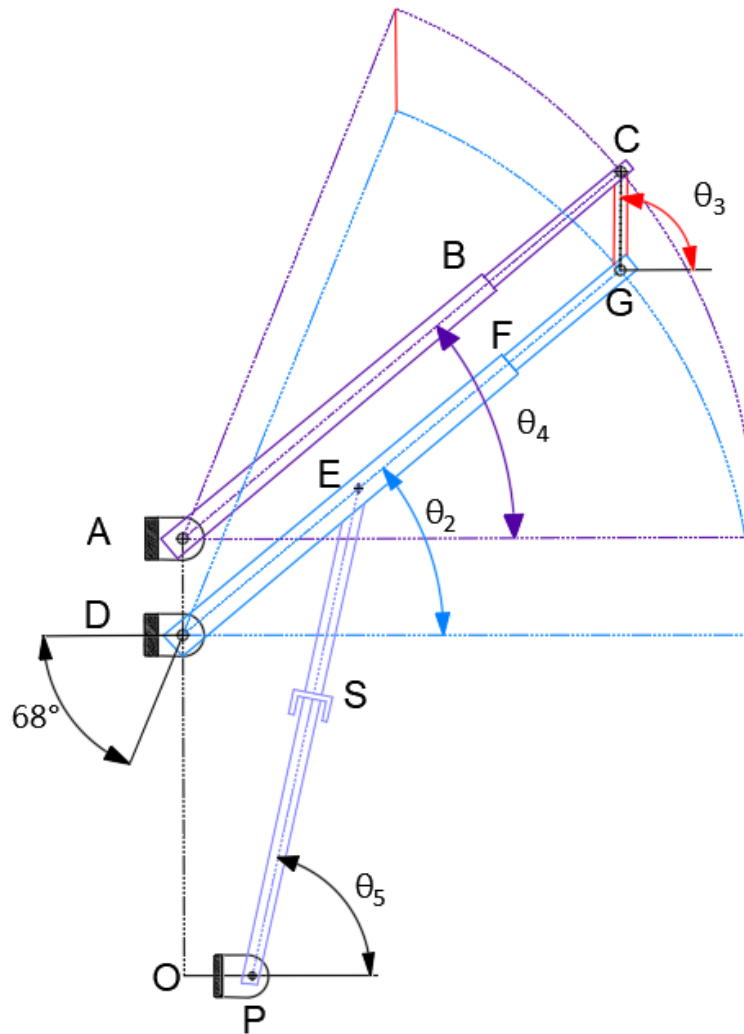


Figura 6-2. Representación gráfica del modelo de 4 barras de la silla bipedestadora

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Hay cuatro conjuntos de movimientos que debe accionarse entre tres configuraciones: la rotación de ruedas en la silla de ruedas; el estar de pie o sentado en la configuración del soporte; movimiento de la cadera en el exoesqueleto, y movimiento de la rodilla en el exoesqueleto. La posible combinación es el de un actuador para accionar la rueda de la silla de ruedas y el movimiento de la rodilla en el exoesqueleto, y el otro actuador para conducir el movimiento de la cadera en el exoesqueleto y estar de pie o sentado en la configuración del soporte. Para el movimiento separado de la cadera articulación y sentado / de pie, motor de rotación y motor lineal (Song y Tian 2019).

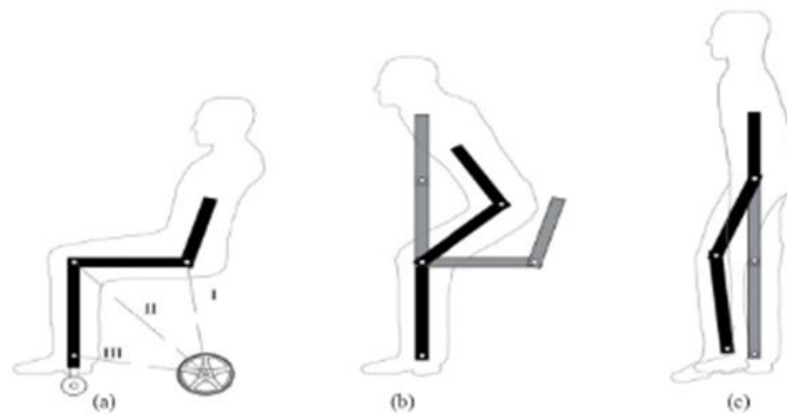


Figura7-2. Análisis de movimiento de la silla de ruedas

Fuente: Baghli ;EL Bakkali 2015

2.3.2. Partes de la silla de ruedas bipedestadora

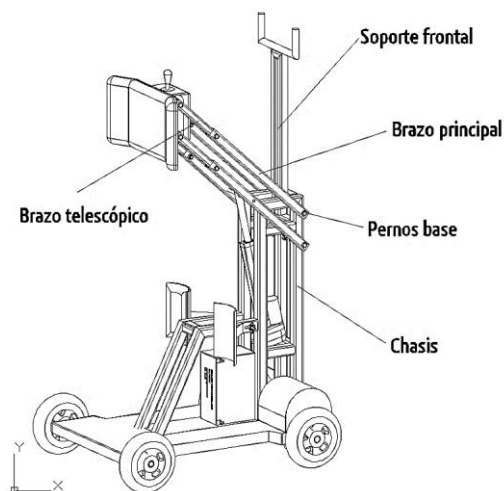


Figura 8-2. Silla de ruedas bipedestadora y sus partes

Fuente: Herrera 2020

El equipo tiene partes móviles que permiten cambiar su configuración, esto implica que la carga que deberá soportar, cambia de ubicación, razón por la cual sus piezas estarán sometidas a distintos estados de esfuerzos. Por tal motivo el cálculo de esfuerzos se realiza en la posición de trabajo crítica para garantizar que ninguna de las piezas del equipo fallara al trabajar con las cargas que el resto de las posiciones del equipo genere sobre estas (Saavedra, García ; San Antonio 2013).

2.4. Modelado

Los modelos son simplificaciones de la realidad. Existen varios tipos de modelos y su forma depende de su aplicación, por ejemplo. Modelos físicos son frecuentemente usados en ingeniería cuando no es práctico usar sistemas reales. Una idea central que envuelve el estudio de la dinámica de un sistema real es la de su modelo. Modelos son construcciones simplificadas y abstractas utilizadas para estudiar y determinar el comportamiento de sistemas. Cuando la representación de la dinámica de un sistema se expresa en términos de operadores y variables se tiene otro tipo de modelo llamado modelo matemático. Este tipo de modelo es más abstracto que el modelo físico y tiene fuertes similitudes con el mismo. El modelo matemático representa solamente propiedades esenciales o primordiales de un fenómeno de interés. A causa de que un modelo es una simplificación de la realidad, hay una gran cantidad de trabajo en la construcción de modelos. Un modelo excesivamente complejo y detallado puede contener parámetros "imposibles" de estimar y/ o muy difíciles de analizar. Un modelo excesivamente simplificado no es capaz de exhibir características importantes (Avalos 2004).

2.5. Método de Bond Graph

El Bond-Graph es una representación gráfica y concisa de los mecanismos de almacenamiento, disipación e intercambio de energía de sistemas, subsistemas y en este caso elementos dinámicos interactivos. Representa gráficamente lo que otras técnicas presentan en ecuaciones o en notación condensada de matrices o tensores (Samantaray, Arun K. 2008).

El propósito general de esta técnica, es la representación de cualquier sistema energético ingenieril en donde estén involucrados distintos dominios o campos de variada naturaleza energética. Esto es de gran utilidad cuando interactúan sistemas eléctricos, hidráulicos, neumáticos o de otro tipo, ya que la representación y tratamiento por Bond Graph es independiente del campo físico de aplicación.

De una manera más simplificada, se puede decir que los grafos de enlace constituyen una representación gráfica de un sistema físico, igual que lo son los diagramas de bloques o los

diagramas de flujo, pero con la diferencia que los Bond Graph representan la información (cambios de energía) de manera bi-dimensional (Ogata 1998).

2.5.1. Bonds

El elemento básico de las gráficas de enlace es el enlace de energía, en este método, la potencia consta de dos variables que se conocen como esfuerzo generalizado, flujo generalizado denotado por e y f respectivamente; estas dos variables son necesarias y suficientes para describir las transferencias energéticas dentro del sistema. El significado físico de las variables de esfuerzo y flujo depende del dominio físico que representa el enlace. Una flecha semicircular unidireccional muestra este intercambio de energía (la flecha en el enlace indica la dirección del flujo de energía positiva) (Baghli ,EL Bakkali 2015).

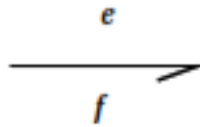


Figura 9-2. Representación de un bond elemento-fuente

Fuente: Baghli , EL Bakkali 2015

Tabla 1-2: Variables encontradas en los gráficos de bonds

Dominio	Esfuerzo (e)	Flujo (f)
Mecánica de traslación	Fuerza	Velocidad
Mecánica rotacional	Torque	Velocidad angular
Electricidad	Voltaje	Corriente

Fuente: Baghli , EL Bakkali 2015

Realizado por: Camacho Michelle 2022

2.5.2. Orígenes del Bond-Graph

La idea de los Bond Graph, surge debido a la necesidad de tener una herramienta, con la cual se pueda estudiar y analizar sistemas de diferentes dominios, por lo tanto el concepto de los grafos de enlace o Bond Graph se origina en el año de 1959 por H.M.Paynter (1923-2002), quien luego fuera profesor en el Departamento de Ingeniería Mecánica del Instituto de Tecnología de Massachusetts MIT, al observar las analogías entre los sistemas eléctricos y mecánicos de una central hidroeléctrica (Gawthrop, P.; Geraint 2007) .

Posteriormente, la idea es desarrollada por sus estudiantes, C. D. Karnopp (más tarde profesor en UC Davis, California) y R. C. Rosenberg (más tarde profesor de la Universidad Estatal de Michigan, Michigan) quienes añaden una publicación la cual es muy completa, en esta además de los conceptos básicos incorporan la aplicación de esta técnica a distintos dominios físicos y su relación con la teoría clásica de vibraciones y de control. Por su parte P. Breedveld y F. Lorenz realizan un importante trabajo tratando de estandarizar la nomenclatura y formulación multibond (multi-enlace) tanto para Bond Graph unidimensionales como multibond. Estos pioneros y sus estudiantes han estado difundiendo sus ideas en todo el mundo (Romero Rey 2005).

De esta forma el método Bond Graph fue desarrollado en la década de 1960 para organizar el flujo de potencia en los sistemas de energía. Es un potente y unificado formalismo para describir sistemas multifísicos, donde los puertos de energía de los componentes están conectados por enlaces que especifican la transferencia de energía entre ellos. Estos enlaces indican la dirección de esta transferencia de energía. En esta terminología existen cuatro tipos de señales: Señales de esfuerzo, de flujo, de esfuerzo integrado y de flujo integrado. Una idea clave de este método es que el producto de las señales de esfuerzo y flujo es igual a la potencia transmitida, es decir, $\text{esfuerzo} \times \text{flujo} = \text{potencia}$ (de Miguel Sala 2016).

El Bond-Graph es una representación gráfica y concisa de los mecanismos de almacenamiento, disipación e intercambio de energía de sistemas, subsistemas y en este caso elementos dinámicos interactivos. Representa gráficamente lo que otras técnicas presentan en ecuaciones o en notación condensada de matrices o tensores.

El propósito general de esta técnica, es la representación de cualquier sistema energético ingenieril en donde estén involucrados distintos dominios o campos de variada naturaleza energética. Esto es de gran utilidad cuando interactúan sistemas eléctricos, hidráulicos, neumáticos o de otro tipo, ya que la representación y tratamiento por Bond Graph es independiente del campo físico de aplicación (José A 2011).

En Gawthrop y Smith y en Borutzky y Cellier se propone un método para abrir los bucles algebraicos establecidos entre puertos resistor y entre puertos almacén con diferente causalidad. Consiste en introducir fuentes (de flujo o esfuerzo de valor nulo) en puertos unión tipo T y unión tipo 'O' que formen parte de estos bucles. Las ecuaciones añadidas son equivalentes a las

generadas con la introducción de multiplicadores de Lagrange. Las ecuaciones finales relacionan los multiplicadores de Lagrange con las variables de estado independientes del sistema.

En Borutzky la idea de apertura de bucles topológicos es la misma que la propuesta por Gawthrop y Smith. Añade la particularidad de introducir también fuentes de valor residual nulo para abrir bucles cerrados de Bonds (Romero Rey 2005).

Hood et al simplemente plantean la capacidad que tiene la causalidad de detectar bucles algebraicos entre resistores lineales y la necesidad de establecer un número mínimo de estas variables de iteración. Para ello proponen la técnica de orden básico en sistemas muy sencillos. Sin embargo, no se propone ningún mecanismo de resolución de estos sistemas.

Lorenz y Wolper también se centran en la existencia de bucles algebraicos entre puertos resistor. Sugieren la asignación "robusta" de causalidad, pero caen en la cuenta de que, si bien se reduce el número de bucles algebraicos, éstos no desaparecen usando esta técnica de asignación causal.

Van Dijk y Breedveld establecen una clasificación de las rutas causales de orden cero y muestran la estructura y relaciones que presentan las variables del espacio de semi-estado en problemas con formulación DAE. No se sugiere ningún método de resolución para los bucles topológicos.

Brownes aplica la regla de Masón para extraer de un BG la función de transferencia entre dos puertos cualesquiera en función de los valores de las ganancias entrada/salida.

Lamb et al. aplican también la regla de Masón a ciclos causales y los clasifican en propios e impropios.

Lamb et al. clasifican los modelos BG en singulares y no singulares. Los BG no singulares serían aquellos en que una variable salida se puede escribir en función de una variable entrada sólo si existe una asignación no singular de causalidad entre los puertos implicados.

Lamb et al. muestran equivalencias de diferentes subgrafos antes de efectuar la asignación causal. Estas equivalencias son útiles en la simplificación de modelos BG.

Lamb et al. definen un modelo BG como primitivo si no contiene transformers ni gyrators.

Gawthrop introduce bonds bicausales. Consisten en bonds dotados de dos trazos causales que se pueden aplicar a sistemas con parámetros desconocidos, como pueden ser sistemas inversos en teoría de control. También puede ser útil en estimación de valores de parámetros desconocidos y en estimación de los estados del sistema.

Breedveld indica cómo descomponer canónicamente elementos multipuerto en puertos simples y dobles, pero con una estructura diferente. Para ello hace uso de matrices de transmisión. Esta descomposición puede resultar útil en el diseño de elementos bipuerto que están regidos por leyes

especificadas a priori.

Algunos autores han investigado las bases matemáticas del método, aplicando teoría algebraica y matricial para la resolución de problemas generales planteados en BG. Las restricciones físicas son las que provocan mayores trastornos en el análisis, manifestándose como bucles algebraicos que requieren soluciones matemáticas apropiadas.

Félez, Vera y Cacho presentan una formulación que permite reducir el índice de un sistema hasta obtenerlo exclusivamente en función de sus grados de libertad. Las matrices necesarias para efectuar esta reducción se obtienen directamente del BG.

También se ha tratado de buscar el acoplamiento entre los principios de la mecánica clásica y el planteamiento de los análisis BG. La mecánica hamiltoniana y la lagrangiana son los procedimientos sobre los que más se ha incidido.

Otros autores investigados tratan de automatizar tanto el modelado como el análisis de sistemas con técnica BG.

Por su parte, Breedveld y Lorenz realizan un importante trabajo tratando de estandarizar la nomenclatura y formulación multibond tanto para BG unidimensionales como multibond (Romero Rey 2005).

2.5.3. Formulación de gráficos de unión

Los gráficos de unión (bond graphs) son grafos dirigidos cuyos vértices son llamados "puertos" los cuales representan subsistemas, componentes o elementos básicos de un sistema. Las aristas del grafo se conocen como "uniones" y representan el intercambio de energía entre los puertos a través de variables conjugadas de potencia, denominadas genéricamente esfuerzo e y flujo f , cuyo producto, en cualquier dominio energético representa potencia, por ejemplo: fuerza y velocidad, en un sistema mecánico de traslación, voltaje y corriente en el dominio eléctrico, y otras (Crampin EJ; Halstead M; Hunter P; Nielsen P; Noble D 2003).

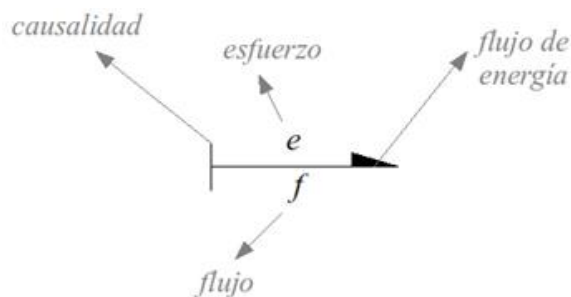


Figura 10-2. Nomenclatura común en un gráfico de unión

Fuente: Mathews 1992

2.5.4. Elementos básicos del Bond Graph

Hay cuatro tipos de componentes etiquetados como S, C, I, R, estos componentes elementales se clasifican por su comportamiento energético (disipación de energía, almacenamiento de energía, etc.) y definen cómo las variables de esfuerzo y flujo en el enlace se relacionan entre sí (Baghli ,EL Bakkali 2015).

La técnica de Bond-Graph permite que, con la clasificación de variables presentada en el apartado anterior sólo se necesite una pequeña cantidad de elementos para poder representar modelos de cualquier dominio físico.

Tabla 2-2: Elementos básicos en el bond graph

Componente	Símbolo	Tipo de elemento	Ejemplo en el dominio de la mecánica de traslación	Ejemplo en el dominio de la mecánica rotacional	Ejemplo en dominio eléctrico
Elementos activos	Se	Fuente de esfuerzo	Fuente de fuerza	Fuente de par	Fuente de voltaje
	Sf	Fuente de flujo	Fuente de velocidad	Fuente de velocidad angular	Fuente de corriente
Elementos pasivos	R	Disipación	Apagado	Apagado	Resistencia
	I	Almacenamiento	Inercia	Inercia	Inductor
	C		Cumplimiento	Cumplimiento	Condensador

Fuente: Baghli , EL Bakkali 2015

Realizado por: Camacho Michelle 2022

2.5.4.1. Elementos fuente

Los elementos fuente son aquellos que suministran potencia al sistema. Esta potencia puede ser suministrada a partir de un flujo conocido o mediante un esfuerzo conocido. Así pues, respectivamente, habrá dos tipos de fuentes:

- a) Fuentes de Flujo, con flujo conocido.
- b) Fuentes de Esfuerzo, con esfuerzo conocido (Antonio M 2000).

Fuentes de esfuerzo.

Son aquellas que provocan una entrada de esfuerzo al sistema (Antonio M 2000).



Figura 11-2. Fuente de esfuerzo

Fuente: Antonio M 2000

Fuentes de flujo.

Son aquellas que provocan una entrada de flujo al sistema (Antonio M 2000).



Figura 12-2. Fuente de flujo

Fuente: Antonio M 2000

2.5.4.2. Elementos que almacenan energía.

Aquellos elementos que son susceptibles de almacenar energía, y de devolverla íntegramente al sistema sin ninguna pérdida. En Bond-Graph, se consideran dos tipos básicos de elementos que almacenan energía: las Puertas Rigidez y las Puertas Inercia (Antonio M 2000).

Puerta rigidez.

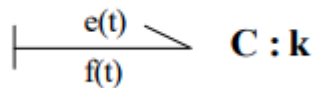


Figura 13-2. Puerta rigidez

Fuente: Antonio M 2000

Estas puertas se dibujan en Bond-Graph tal como se muestra y representan elementos donde el esfuerzo que aparece se puede expresar como la integral a lo largo del tiempo del producto del flujo que se produce por un parámetro $k(t)$ (Antonio M 2000):

$$e(t) = \int_0^t k(t)f(t)dt \quad (1)$$

En sistemas dinámicos lineales, el parámetro k suele ser un parámetro constante no dependiente del tiempo, escribiéndose:

$$e(t) = k \int_0^t f(t) dt \quad (2)$$

Dado que la integral del flujo, es el desplazamiento $q(t)$, se puede escribir:

$$e(t) = k \cdot q(t) \quad (3)$$

El nombre de este tipo de puertas, se debe a que el comportamiento expresado, es el que presenta, en el dominio de la Mecánica, la rigidez de un resorte lineal. En este caso, el esfuerzo es la fuerza “F” aplicada al resorte y el desplazamiento es la deformación total “ ΔL ” experimentada por el resorte entre sus extremos. Pero se pueden encontrar otros tipos de elementos con este tipo de comportamiento en otros dominios de la Física (Antonio M 2000).

Puerta inercia.

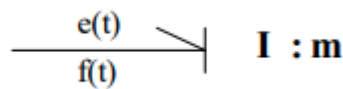


Figura 14-2. Puerta inercia

Fuente: Antonio M 2000

Estas puertas se dibujan en Bond-Graph tal como muestra., y representan elementos donde el esfuerzo que aparece se puede expresar como la derivada temporal del producto del flujo que se produce por un parámetro $m(t)$:

$$e(t) = \frac{d[m(t)f(t)]}{dt} \quad (4)$$

En sistemas dinámicos lineales, el parámetro m suele ser un parámetro constante no dependiente del tiempo, escribiéndose:

$$e(t) = m \frac{d[f(t)]}{dt} \quad (5)$$

El nombre de este tipo de puertas es el que presenta, en el dominio de la Mecánica Newtoniana, una masa inercial. En este caso, el esfuerzo es la fuerza “F” aplicada sobre una masa “m” y la derivada del flujo es la aceleración que la masa experimenta en la dirección y sentido de aplicación de la fuerza (Antonio M 2000).

2.5.4.3. Elementos de disipan energía.

Puerta resistencia.

Son aquellos dispositivos o situaciones donde se produce una disipación de energía.

Un ejemplo claro es el de la resistencia eléctrica, que al paso de una intensidad de corriente produce una caída de tensión. Otro ejemplo claro lo constituye el amortiguador hidráulico, que opone una resistencia, o fuerza opuesta a su movimiento, proporcional a la velocidad a la que se quiere desplazar. Otros ejemplos son la pérdida de energía por rozamiento mecánico de un sólido que se desplaza apoyado en otro sólido, o la pérdida de carga que se produce en una tubería debido al paso de un fluido (Antonio M 2000).



Figura 15-2. Puerta Resistencia

Fuente: Antonio M 2000

2.5.4.4. Nodos de unión.

Aquellos puntos del sistema donde existen una o varias entradas de energía y una o varias salidas de ésta, se forma un nodo cuya característica principal es que en él se cumple el principio de conservación de la energía (Ogata 1998).

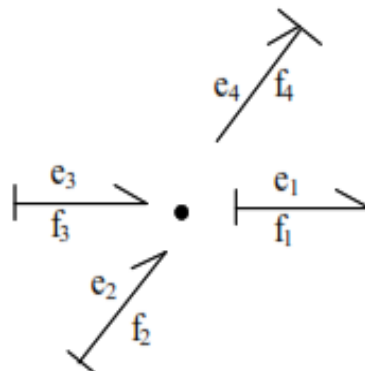


Figura 16-2. Nodos de unión

Fuente: Antonio M 2000

Donde “n” es el número de grafos entrantes al nodo y “m” es el número de grafos salientes del nodo. Los componentes se conectan entre sí mediante dos tipos de uniones: una unión de esfuerzo común o 0 y una unión de flujo común o 1. La unión 0 tiene las siguientes propiedades: todos los enlaces que inciden sobre ella tienen la misma variable de esfuerzo y todos los flujos en los enlaces adjuntos suman cero. De manera similar, la unión 1 tiene las propiedades: todos los enlaces que inciden sobre ella tienen la misma variable de flujo y todo el esfuerzo en los enlaces adjuntos suman cero (Baghli , EL Bakkali 2015).

Nodo de unión 0

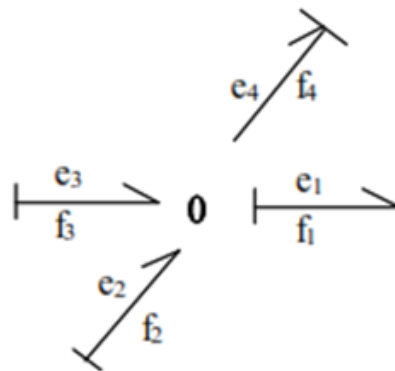


Figura 17-2. Nodos de unión 0

Fuente: Antonio M 2000

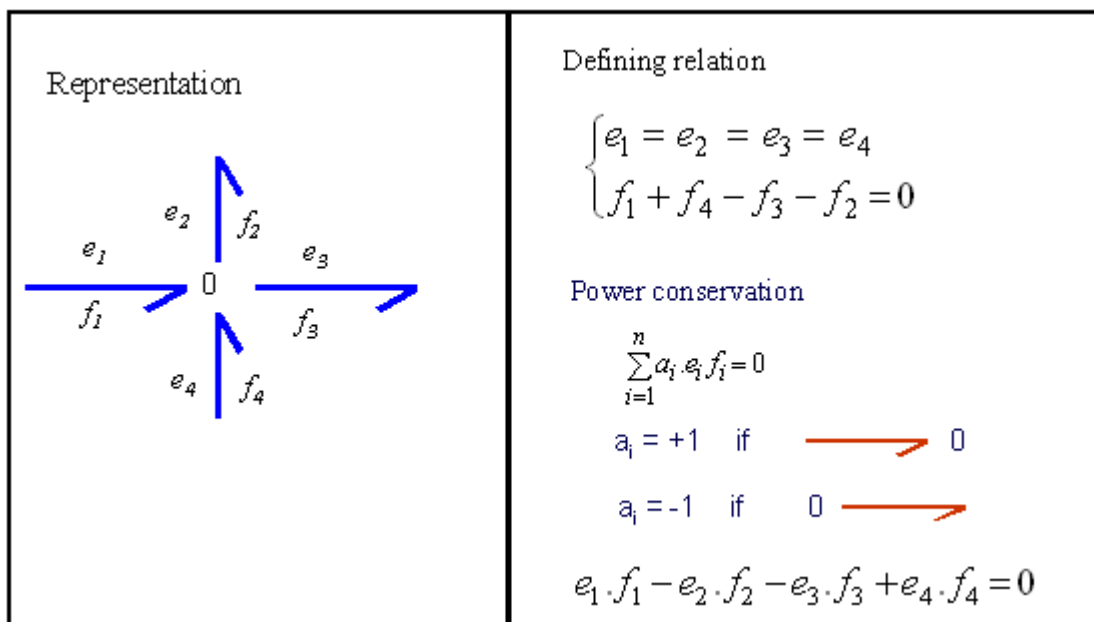


Figura 18-2. Representación de nodo de unión 0 y sus ecuaciones

Fuente: Antonio M 2000

En los nodos de unión tipo 0 se cumple:

$$e_1 = e_2 = e_3 = e_4 \quad (6)$$

Todos estos esfuerzos son iguales en valor y signo, independientemente del sentido que presenten los grafos correspondientes respecto de la unión (Gawthrop, P.; Geraint 2007).

Nodo de unión 1

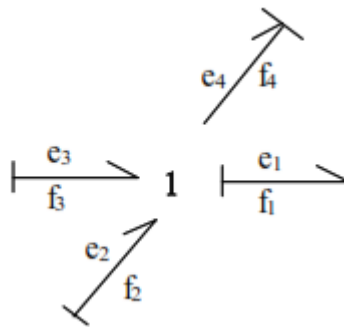


Figura 19-2. Nodo de unión 1

Fuente: Antonio M 2000

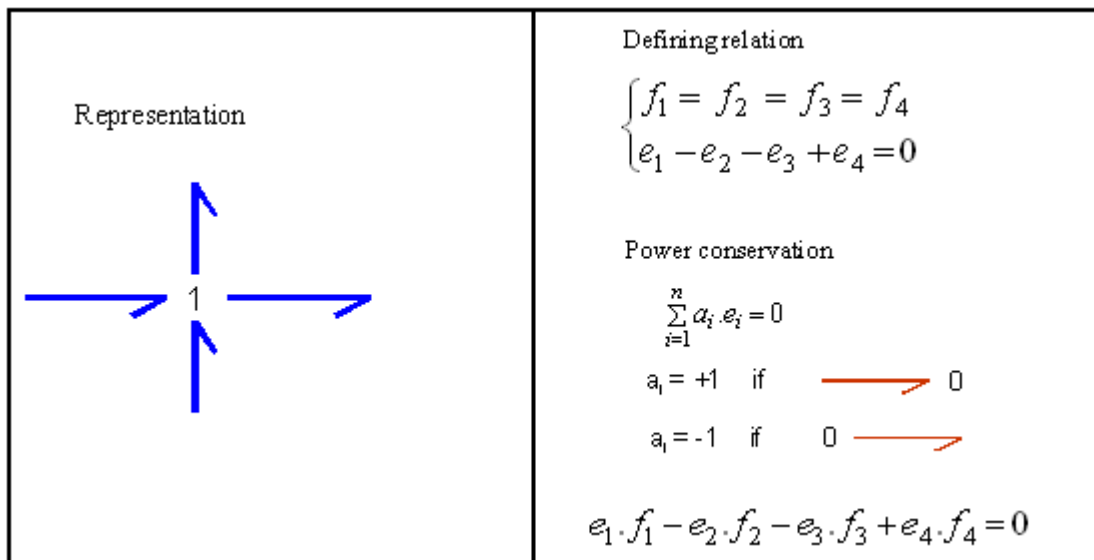


Figura 20-2. Representación de nodo de unión 1 y sus ecuaciones

Fuente: Antonio M 2000

En los nodos de unión tipo 0 se cumple:

$$f_1 = f_2 = f_3 = f_4 \quad (7)$$

Todos estos flujos son iguales en valor y signo, independientemente del sentido que presenten los grafos correspondientes respecto de la unión (Mathews 1992).

Elementos transformer

Estas transformaciones de esfuerzos y flujos sin pérdida de potencia se representan en Bond Graph mediante el elemento transformer. El elemento transformer viene definido por un grafo de entrada y otro de salida, así como por un valor o razón del transformer “p”. En estos elementos se cumple que el flujo de salida es igual al flujo de entrada multiplicado por la razón del transformer y, a la inversa, el esfuerzo de salida es el esfuerzo de entrada dividido por la razón (Jóse A 2011).

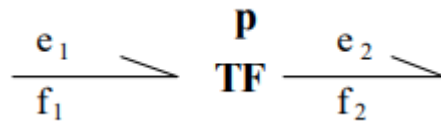


Figura 21-2. Elementos transformer

Fuente: Antonio M 2000

El elemento transformer viene definido por un grafo de entrada y otro de salida, así como por un valor o razón del transformer “p”. En estos elementos se cumple que el flujo de salida es igual al flujo de entrada multiplicado por la razón del transformer y, a la inversa, el esfuerzo de salida es el esfuerzo de entrada dividido por la razón (Antonio M 2000).

Elementos gyrator

Estos elementos transforman flujos en esfuerzos y esfuerzos en flujos. Están formados por un grafo de entrada, otro de salida y la razón del gyrator “p”. Como en el caso de los transformer, no hay pérdida de potencia (Antonio M 2000).

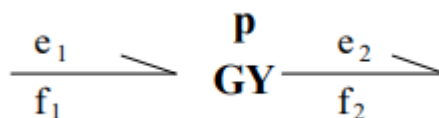


Figura 22-2. Elementos gyrator

Fuente: Antonio M 2000

Se cumple que:

$$e_2 = p * f_1 \quad (8)$$

$$e_1 = p * f_2 \quad (9)$$

$$e_2 \cdot f_2 = p \cdot f_1 \cdot \left(\frac{1}{p}\right) \cdot e_1 = e_1 \cdot f_1 \quad (10)$$

2.5.5. La causalidad

El gráfico de ordenamiento causal (COG) es un formalismo gráfico desarrollado en la década de 1990 con el que se puede describir un sistema desde un enfoque funcional y causal (de Miguel Sala 2016).

Con este gráfico las entradas y salidas de cada dispositivo se definen por su propia causalidad y por su asociación con otros dispositivos, proporcionando una visión global más sintética. En este método solo se acepta la causalidad física (causalidad integral) y no la derivativa. Tras la representación gráfica es posible deducir fácilmente una metodología de control basada en la inversión, siguiendo una serie de especificaciones que se explicarán posteriormente. Estas especificaciones se basan en buscar la variable de entrada adecuada para una determinada salida (de Miguel Sala 2016).

Se entiende por hallar la causalidad de los grafos del diagrama de Bond-Graph, el determinar, de las dos variables que llevan asociadas todos los grafos, cuál de ellas es función de la otra. Nunca ambas serán independientes y siempre dependerá de la otra. Por ejemplo, en mecánica cuando la causa es esfuerzo el efecto es una velocidad, a la inversa, cuando la causa es velocidad, el efecto es un esfuerzo. En el primer caso, el esfuerzo sería la variable independiente y la velocidad la variable dependiente, diciendo que el grafo asociado al fenómeno tiene causalidad esfuerzo. En el segundo caso, la variable independiente es la velocidad y el esfuerzo será la variable dependiente, diciendo que el grafo asociado al fenómeno tiene causalidad flujo (José A 2011).

La representación de la causalidad en Bond-Graph se realiza mediante un trazo transversal en el extremo del grafo en el sentido de la causalidad esfuerzo (Cellier 2001).

Tabla 3-2: Reglas de aplicación de la causalidad en bond-graph

Dominio Físico	Variables de Potencia		Variables de energía	
	Esfuerzo e	Flujo f	Momento p	Desplazamiento q
Eléctrico	Voltaje	Corriente	Flujo concatenado	Carga
Traslación	Fuerza	Velocidad	Impulso	Desplazamiento
Rotación	Momento	Velocidad angular	Momento angular	Ángulo
Fluido dinámico	Presión	Caudal	Impulso del Fluido	Volumen
Electromagnetismo	Tensión	Corriente	Flujo magnético	Carga eléctrica
Química	Potencial Químico	Flujo molar		Número de moles
Termodinámica	Temperatura absoluta	Flujo de entropía		Entropía
Hidráulico	Presión	Caudal volumétrico	Momento	Volumen

Fuente: Cellier 2001

Realizado por: Camacho Michelle 2022

La representación mediante BG describe a los sistemas dinámicos a partir de los flujos de potencia representados por elementos gráficos básicos: los Bond, mientras que, las partes del sistema total son caracterizadas por “puertos” en donde se realizan distintas operaciones sobre dicha potencia. Este enfoque general del modelado permite representar distintos dominios físicos bajo mismo formalismo. Para este fin se describe al flujo de potencia como el producto algebraico de dos variables, denominadas variable de esfuerzo generalizado (e) y variable de flujo generalizado(f). Estas variables serán entradas o salidas de cada puerto, según corresponda. Las operaciones realizadas en estos últimos (los puertos), será representada en su ecuación constitutiva. La relación entre las variables generalizadas y las ecuaciones constitutivas se pueden resumir en el tetraedro de Paynter o tetraedro de los estados (Mc Hardy, Isaias J; Flury, Celso A; Venturini 2016).

Los BG permiten además representar el orden en el cual estas operaciones son realizadas, en su representación de la causalidad. Esta característica es fundamental para la utilización de los BG en la detección de fallas. Mediante la inversión de la causalidad una medición (o salida) por

ejemplo, puede convertirse en una fuente (o entrada). Esta inversión se utiliza para, en última instancia, obtener señales en el sistema de diagnóstico que sirvan para la identificación de comportamientos defectuosos de la planta (señales que son llamadas residuos r) (Mc Hardy, Isaias J; Flury, Celso A; Venturini 2016).



Figura 23-2. Causalidad integral (izquierda) y derivativa (derecha) para un elemento capacitivo.

Fuente: Mc Hardy, Isaias J; Flury, Celso A; Venturini 2016

La causalidad es representada por un segmento de línea en uno de los dos extremos y perpendicular al eje del arpón. Los diagramas de bloque han mostrado las diferencias en el cálculo que implican los dos tipos de causalidad. Los puertos son representados utilizando letras y números, un tipo de puerto importante para el diagnóstico de fallas es el de los elementos multi-puertos tipo 1 y 0. Estos puertos representan condiciones de interconexión entre las partes, mientras que la inversión de causalidad se utiliza para identificar entradas en el sistema de diagnóstico, los multi-puertos son utilizados como “condición de buen funcionamiento”.

Tabla 4-2: Símbolos utilizados en la representación de puertos y sus ecuaciones.

1-puerto		2-puerto		n-puerto	
Símbolo	Ecuación	Símbolo	Ecuación	Símbolo	Ecuación
R	$e = Rf$	TF	$f_1 = kf_2$ $e_1 = \frac{e_2}{k}$	1	$f_1 = f_2 = \dots = f_n$ $e_1 + e_2 + \dots + e_n = 0$
I	$e = I \frac{\partial f}{\partial t}$				
C	$f = C \frac{\partial e}{\partial t}$	GY	$f_1 = ke_2$ $e_1 = \frac{f_2}{k}$	0	$e_1 = e_2 = \dots = e_n$ $f_1 + f_2 + \dots + f_n = 0$

Fuente: Mc Hardy, Isaias J; Flury, Celso A; Venturini 2016

Realizado por: Camacho Michelle 2022

2.5.6. Mecanismos en Bond-Graph

Los primeros pasos en la formulación de sistemas mecánicos son dados por Rosenberg. I. Aunque el método que plantea es conceptualmente sencillo, la formulación que utiliza es bastante engorrosa y se limita únicamente a mecanismos planos. Alien presenta una formulación más elaborada basada en elementos multipuerto aplicable a mecanismos con lazos, donde las ecuaciones de lazo de velocidad y desplazamiento deben ser conocidas. Posteriormente, extiende su formulación a sistemas tridimensionales usando coordenadas relativas. Indica también cómo se pueden obtener a partir de sus ecuaciones las fuerzas de conexión en pares cinemáticos. La formulación usada es poco estructurada por emplear sólo notación con bonds simples. Brown realiza una descripción muy breve sobre la aplicación de la técnica de BG a sistemas dinámicos no holonómicos. Kamopp y Margolis presentan un método para el análisis y simulación de mecanismos planos usando BG. Su planteamiento se basa en introducir elementos elásticos en lugar de las restricciones, aumentando así los grados de libertad. Este planteamiento presenta el problema de que las ecuaciones resultantes tienen un comportamiento fuertemente stiff. Alien da los pasos fundamentales para representar las propiedades de las inercias de una forma integrada en el BG en sistemas multibond (Romero Rey 2005).

2.6. Simulación de mecanismos

La cinemática estudia los movimientos de partículas y cuerpos rígidos sin tener en cuenta la fuerza necesaria para dar lugar a estos movimientos. La estática es el estudio de los sistemas mecánicos donde la resultante del sistema de fuerzas es cero y, por tanto, están equilibradas (en descansar o moverse a velocidad constante). Finalmente, cuando éste resultado no es cero, el sistema mecánico está cargado con movimiento acelerado, y estos desequilibrados fuerzas y los movimientos que dan lugar, comprenden el campo de estudio llamado dinámica. Cuando se trata de estudiar el movimiento de un mecanismo, es fundamental elegir un sistema de referencia u otro. Por tanto, un sistema de coordenadas locales normalmente será elegido al estudiar sólidos tridimensionales, que requiere un cambio de sistemas de referencia en las existentes articulaciones de un mecanismo de este tipo. Al analizar el comportamiento de un mecanismo que solo se mueve en un plano, resulta mucho más sencillo trabajar con un sistema de coordenadas que son paralelas al sistema global, lo que evita tener que cambiar los sistemas de referencia en las articulaciones (Romero et al. 2006).

La línea de modelización más actual de sistemas multi-dominios, es el modelado físico, cuya idea central es subdividir el modelo global en una jerarquía de subsistemas y considerar el comportamiento en los nodos de conexión. Estos subsistemas pueden tener numerosos niveles. En el nivel más bajo se representan los elementos básicos que se agrupan para formar un subsistema de nivel superior. Estos subsistemas pueden agruparse para formar otros y así

sucesivamente hasta completar el modelo.

Los submodelos son encapsulables:

1. Los puertos de conexión entre submodelos están definidos como pares de variables. La utilización de pares de variables conjugadas en potencia hace que las conexiones sean físicas, ejemplos fuerza y velocidad, par y velocidad, presión y caudal.

2. Los submodelos han de estar escritos en estilo declarativo, es decir, estableciendo relaciones y no procedimientos para computar. Esta descripción se llama no “causal” («Modelización teórica de los componentes básicos» 2007).

2.6.1. Matlab / Simulink

Matlab es un lenguaje de computación técnica de alto nivel y un entorno interactivo para desarrollo de algoritmos, visualización de datos, análisis de datos y cálculo numérico. Permite resolver problemas de cálculo técnico más rápidamente que con lenguajes de programación tradicionales, tales como C, C++ y Fortran.

Simulink, originalmente llamado Simulab, es una plataforma para simulación multidominio y diseño basado en modelos de sistemas dinámicos. Proporciona un entorno gráfico interactivo y un conjunto de bibliotecas de bloques personalizables que permiten diseñar, simular, implementar y probar sistemas de control, procesamiento de señales y comunicaciones y otros sistemas variables en el tiempo.

Tanto Matlab como Simulink fueron desarrollados a principios de los 90 por "The MathWorks" y hoy en día son el producto de fusiones con distintos programas como Matrix X, compuesta por Xmath, SystemBuild y RealSim.

Adicionales amplían el entorno de Simulink con herramientas para tareas específicas de modelado y diseño y para la generación de código, implementación de algoritmos, pruebas y verificaciones. Permite crear, modelar y actualizar rápidamente un diagrama de bloques detallado de su sistema gracias a un conjunto exhaustivo de bloques predefinidos. Incluye herramientas para el modelado jerárquico, la gestión de datos y la personalización de los subsistemas, lo que facilita la creación de representaciones precisas y exactas independientemente de la complejidad de los sistemas.

Simulink está integrado con Matlab, lo que ofrece acceso inmediato a una extensa gama de herramientas para el desarrollo de algoritmos, la visualización y el análisis de datos y el cálculo numérico.

Admite la incorporación de código de Matlab, C, Fortran y Ada en los modelos, lo que a su vez hace posible incluir código manual y crear bloques personalizados, además de constituir un método alternativo de representar algoritmos en los modelos (Romero Rey 2005).

2.6.2.20-Sim

20-sim es un programa de modelado y simulación que se ejecuta en Microsoft Windows. Con 20-sim puedes simular el comportamiento de sistemas dinámicos, como sistemas eléctricos, mecánicos e hidráulicos o cualquier combinación de estos. 20-sim es totalmente compatible con el modelado gráfico, lo que permite diseñar y analizar sistemas dinámicos de una manera intuitiva y fácil de usar, sin comprometer la potencia (Kleijn, Ir. C.; Groothuis 2016).

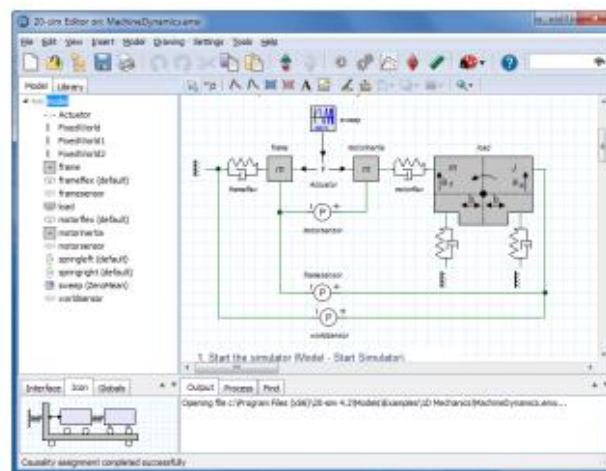
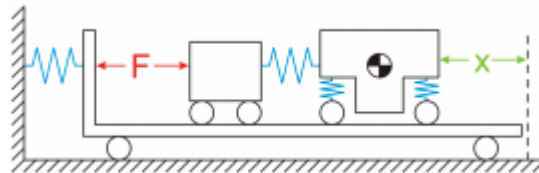


Figura 24-2. Ejemplo de sistema modelado en 20-Sim.

Fuente: Kleijn, Ir. C.; Groothuis 2016

20-sim consta de dos ventanas principales y muchas herramientas. La primera ventana es el Editor y la segunda es el Simulador. El Editor se usa para ingresar y editar modelos. El Simulador se utiliza para simular y analizar los modelos. El simulador se abre en el editor haciendo clic en el botón Iniciar simulador del menú Modelo.

Simulador

El Simulador se utiliza para realizar simulaciones, mostrar los resultados y analizarlos.

El simulador consta de tres partes:

- Árbol del simulador: está en la izquierda. Permite agregar gráficos y ventanas de gráficos.
- Gráfico de simulación: es el gráfico del medio. Muestra los resultados de la simulación.
- Pestaña Salida: la pestaña Salida muestra advertencias y mensajes.

Simulación

Una sesión de modelado y simulación en 20-sim se puede visualizar mediante el diagrama que se

muestra a continuación.

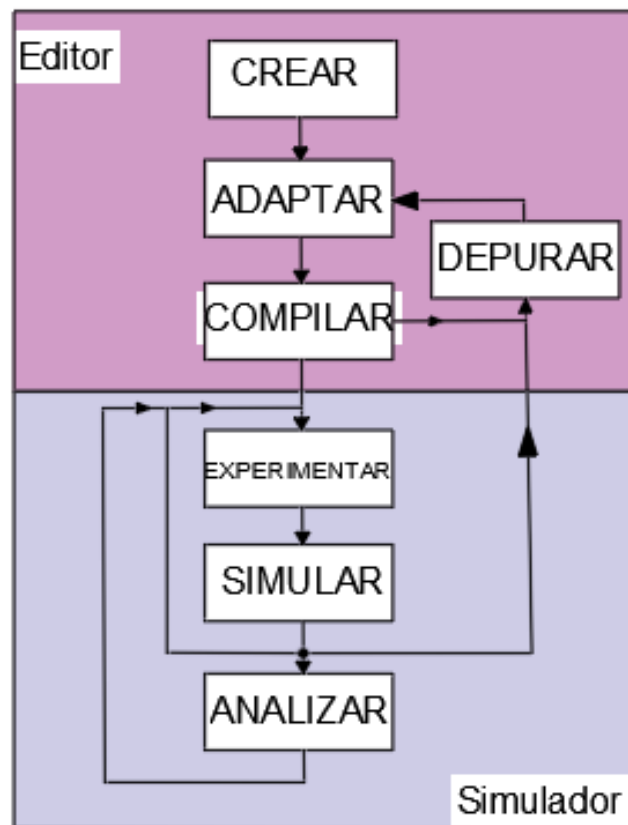


Figura 25-2. Modelado y simulación en 20-sim.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Compilación / depuración

Una vez que el modelo se ha introducido correctamente, debe comprobarse y compilarse para generar el código de simulación. Esto se hace en 20-sim automáticamente cuando abres el Simulador o cuando revisas un modelo. En algunos casos, el modelo contiene errores que deben solucionarse adaptando el modelo. Los errores en 20-sim se presentan en la pestaña Proceso en la parte inferior del Editor.

Ajustes

Después de una compilación exitosa de un modelo que se crea en el Editor, puede abrir el Simulador. En el simulador, debe ingresar configuraciones específicas:

- Parámetros / Valores Iniciales.
- Ejecutar propiedades.
- Propiedades de la parcela.

Los resultados de la simulación se pueden mostrar en 20-sim como:

Gráficas numéricas:

- Dominio del tiempo (predeterminado)
- Dominio de frecuencia (análisis FFT y linealización)
- Animación en un modelo gráfico
- Animación 3D(Kleijn, Ir. C.; Groothuis 2016)

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Requerimientos funcionales

El prototipo se basa en un mecanismo de 4 barras con un actuador lineal que permita el cambio de posición de sedeste a bípedo al usuario, se analizará su traslación óptima, y las configuraciones que intervienen en el sistema.

Con respecto a las posiciones que adoptara la silla de ruedas bipedestadora serán la sedente (silla) y bipedestación (erguida), tomando en cuenta que la velocidad existente entre posiciones será de 0,25 m/s y una velocidad en el actuador de 8 – 20 mm/s. Además, cuidando que en la posición de bipedestación exista una correcta sujeción que evite accidentes.

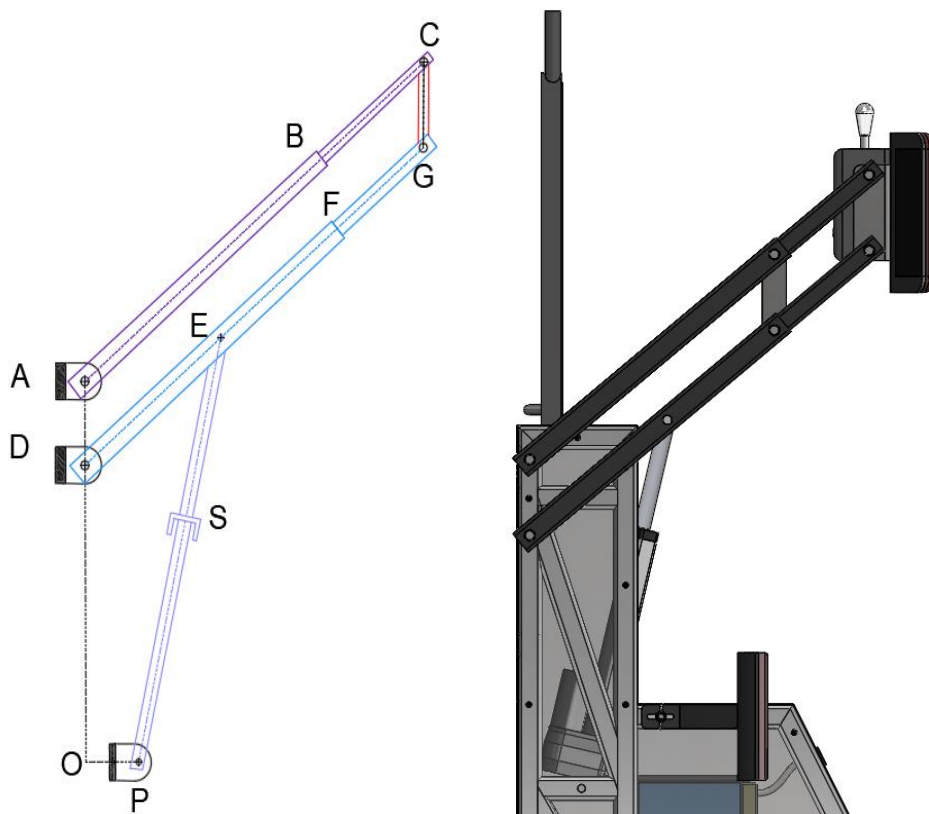


Figura 1-3. Esquema simplificado del mecanismo bipedestador.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

3.2. Dimensiones

La estructura del prototipo debe adaptarse al peso medio de la población mundial de 62 kg. Sin embargo, la norma ISO 10535: 2006 sugiere establecer el diseño para soportar un peso de 120 kg, este concepto se toma para tolerar mejor la carga viva asegurando el correcto funcionamiento del equipo (Terán, Héctor; Arteaga, Oscar; Chiluisa, Kléber; Pérez 2020).

Tabla 1-3: Parámetros de diseño

PARÁMETROS	VALORES
Velocidad lineal	0.25 m/s
Carga viva CG	120 kg
Fuerza cilindro máximo	1500 N

Fuente: Terán, Héctor; Arteaga, Oscar; Chiluisa, Kléber; Pérez 2020

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Para obtener la adaptabilidad del equipo al percentil variable de los usuarios, el concepto utilizado para resolver este problema es el uso de un sistema de correas ajustables que se adapte al beneficiario a su comodidad. La norma ISO 21542: 2012 determina que el ancho del corredor es de 800 mm a 1500 mm, ya que el ancho externo máximo por debajo de la norma asegura que el equipo podrá moverse y maniobrar fácilmente por instalaciones que cumplan con esta norma (Terán, Héctor; Arteaga, Oscar; Chiluisa, Kléber; Pérez 2020).

Tabla 2-3 : Parámetros dimensionales de referencia

ÍTEM	DIMENSIÓN (mm)
a	~ 700
b	~ 246
c	~ 700
d	~ 450
e	~1445
f	~ 400
g	~ 900
h	~ 1200

Fuente: Terán, Arteaga, Chiluisa, & Pérez, 2020

Realizado por: Camacho Michelle 2022

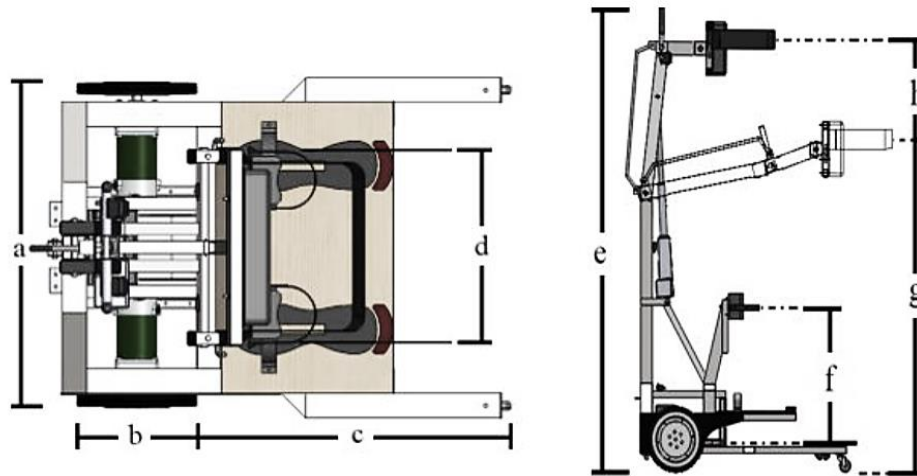


Figura 2-3. Dimensiones generales.

Fuente:Terán, Héctor; Arteaga, Oscar; Chiluisa, Kléber; Pérez 2020

3.3. Componentes eléctricos

3.3.1. Motores

Los motores ayudaran a la traslación del prototipo desde el estado de reposo, estableciendo la carga del usuario y del prototipo en el centro de gravedad, debido a las cargas críticas en el motor que generaran el movimiento partiendo del reposo en un plano horizontal e inclinado. La velocidad promedio de una persona al movilizarse es de $1.82 \frac{m}{s}$ con esto tenemos una aceleración de $8.86 \frac{m}{s^2}$

Tabla 3-3 : Datos motor eléctrico.

Motor LYW200-24	
Torsión	30 Nm
Voltaje	24 V
Corriente	17 A
Velocidad nominal	70 rpm

Fuente:Herrera 2020

Realizado por: Camacho Michelle 2022

3.3.2. Actuador lineal

Debido a que la etapa crítica de desplazamiento es la sedestación, las fuerzas se dividirán en el tronco y el muslo, por lo que sus fuerzas se concentraron en el centro de gravedad, permitiéndonos analizar estáticamente el prototipo, así que esto resultara en una fuerza necesaria para levantar el prototipo, en la que el actuador lineal debe satisfacer como mínimo estos valores.

Tabla 4-3 : Datos actuador lineal

Actuador lineal DHLA750	
Empuje máximo	1500 N
Voltaje	24 V
Velocidad	5 - 12 mm/s
Longitud de carrera	50 - 1000 mm

Fuente:Herrera 2020

Realizado por: Camacho Michelle 2022

3.3.3. Batería

Basándonos en las condiciones podemos del actuador lineal como fuente en los datos de potencia y carga de las simulaciones generadas en el software MSC ADAMS.

UBA0 RN2 C200 FO FCE VERS.3 DH

MOTOR CC 0.25Kw 2 Polos 24V IP54

Donde:

Tipo de actuador: UBA0

Relación interna: RN2

Carrera: C200

Amarre frontal: FO (Horquilla)

Dispositivo final de carrera: FCE (interruptor eléctrico)

Versión de entrada: vers3 brida motor

Posición del eje de entrada: DH lado derecho

Motor de corriente continua: CC

Estándar para motores con freno: IP54

3.4. Análisis del mecanismo

Para el análisis del mecanismo se realizó una simplificación del modelo para la exportación, lo que nos ayudara a encontrar las partes más importantes para el desarrollo de los diagramas de bloques, se procedió a unir la estructura en una sola pieza obteniendo un árbol de componentes más analítico.

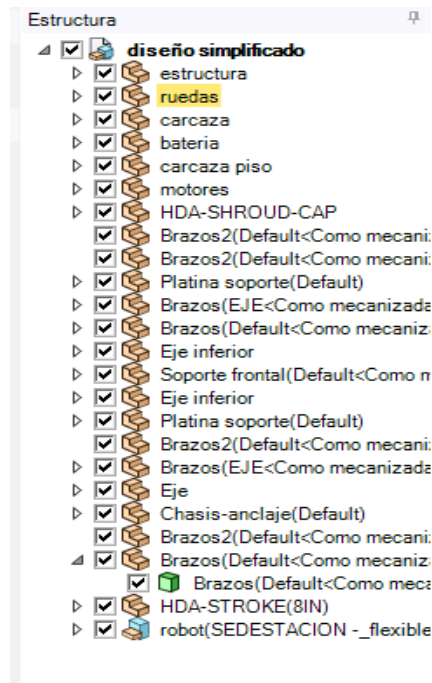


Figura 3-3. Árbol del mecanismo simplificado

Realizado por: Camacho Michelle 2022

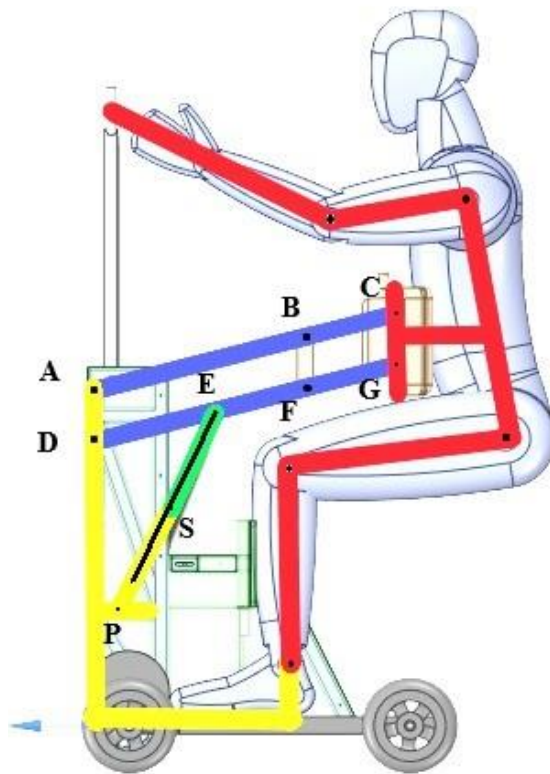


Figura 4-3. Mecanismo principal analizar

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Tabla 5-3 : Elementos actuantes

Elemento	Peso (kg)
Actuador lineal	2
Batería	3,5
Motores	5
Estructura	12
Ruedas	2
Brazos principales	2,4
Pie	1,8
Pantorrilla	5,28
Tronco	60
Pierna	12

Fuente: Herrera 2020

Realizado por: Camacho Michelle 2022

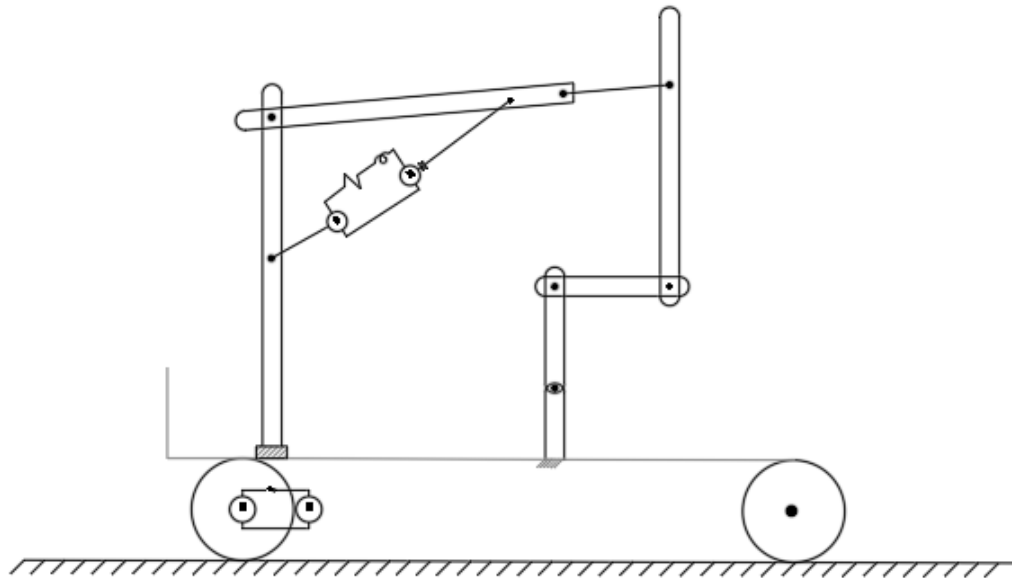


Figura 5-3. Representación de la silla de ruedas a desarrollar con los componentes eléctricos

Realizado por: Camacho Michelle 2022

3.4.1. Puntos de interés para el análisis de Bond Graph

Se analizó los puntos de interés para la realización de los Bond Graph, tomando en cuenta las fuerzas que actuaran sobre los elementos, sabemos que cada elemento recibirá un número para el análisis de inercias y masas necesario.

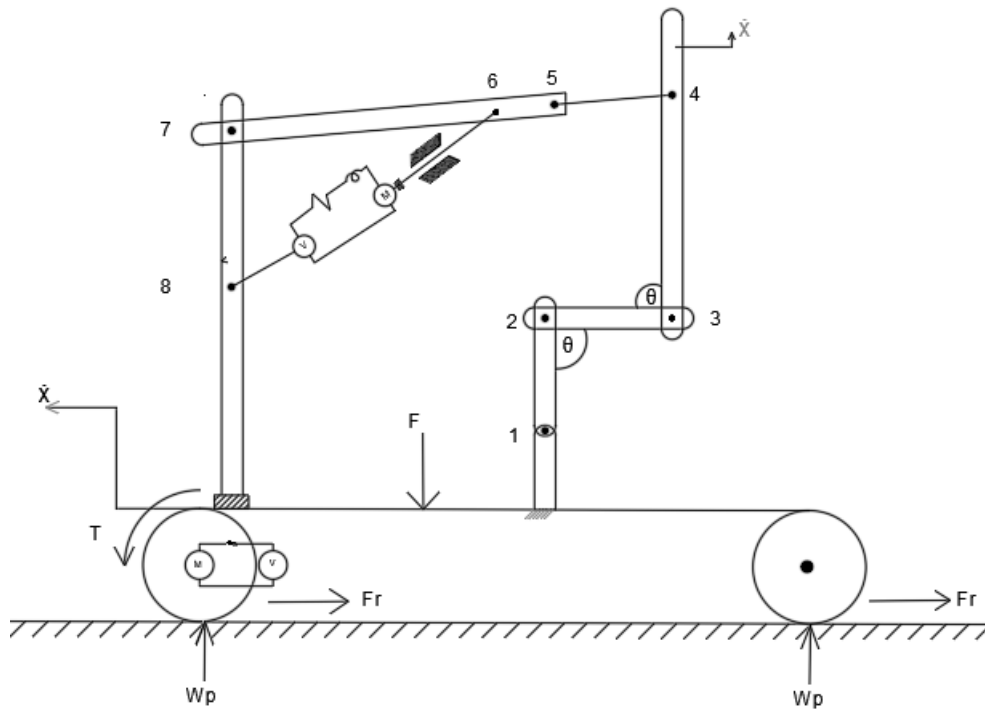


Figura 6-3. Esquema simplificado de los puntos para analizar mediante Bond Graph

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Se procedió a colocar las velocidades angulares a trabajar, necesarias para el análisis del mecanismo en movimiento.

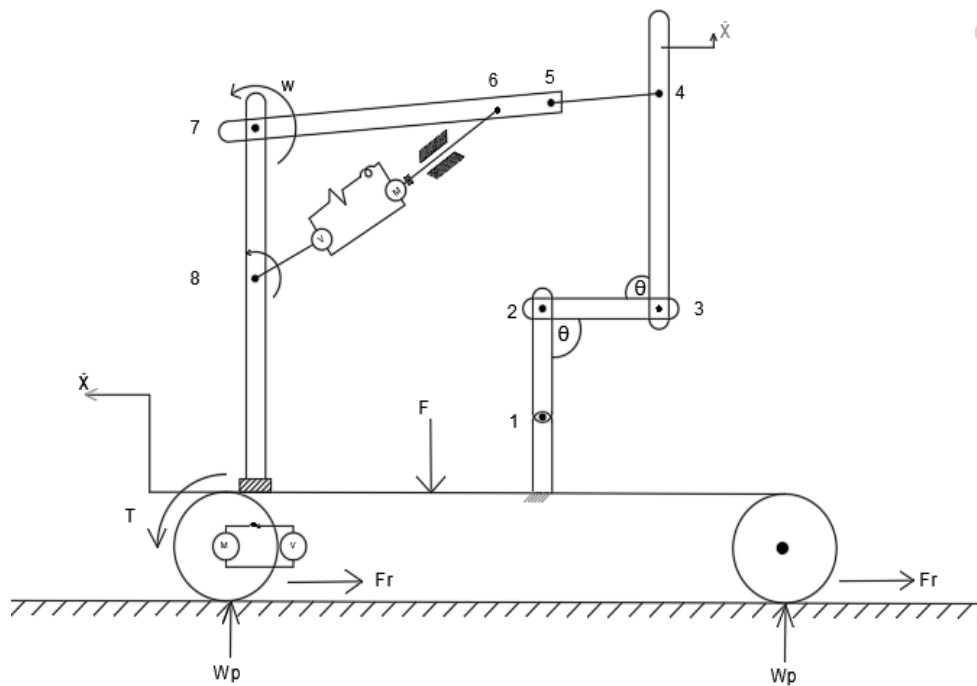


Figura 7-3. Esquema de velocidades y ángulos para el análisis.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Realizamos un diagrama de cuerpo libre con las fuerzas encontradas en el sistema, basándonos en el peso de la estructura, la fuerza de rozamiento y la fuerza general que soporta la silla bipedestadora.

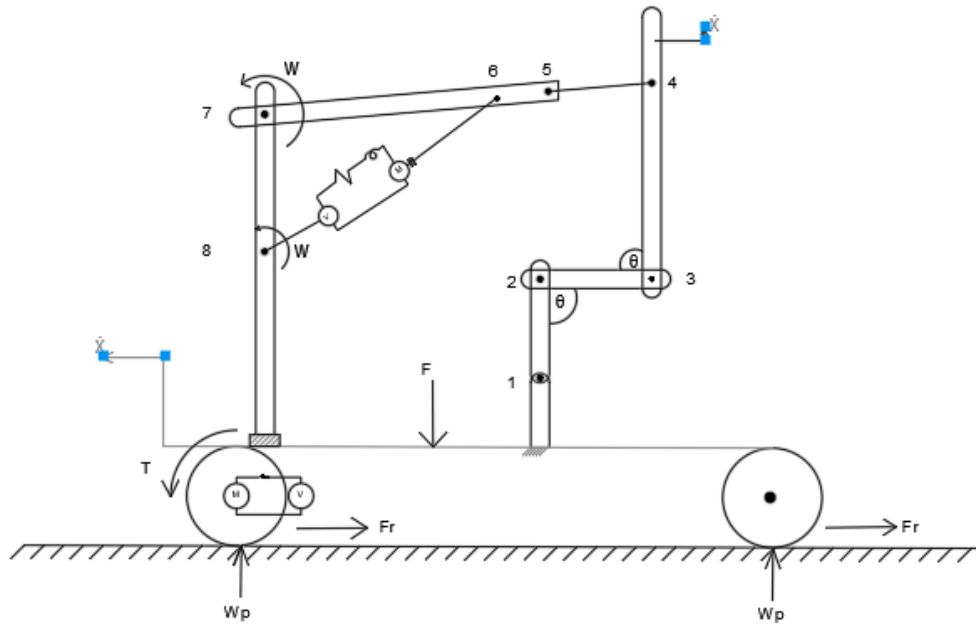


Figura 8-3. Esquema de fuerzas existentes

Realizado por: Camacho Michelle 2022

3.4.2. Inercia mecánica

La inercia es usada para modelizar efectos de inductancias en sistemas eléctricos y masas o inercias en sistemas mecánicos e hidráulicos.

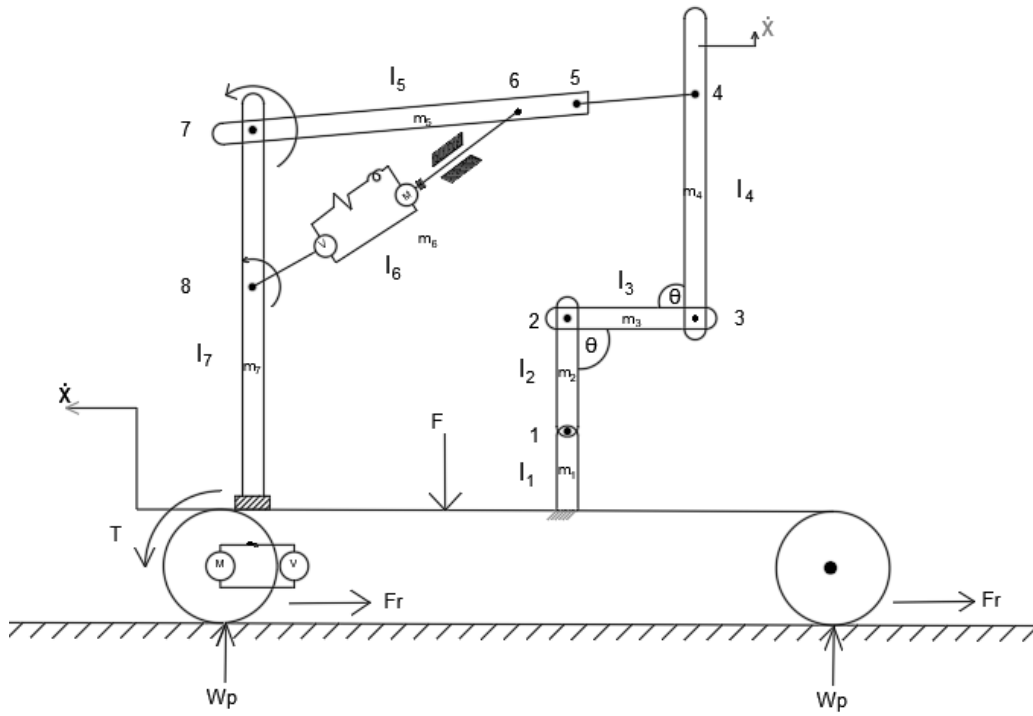


Figura 9-3. Inercias del sistema

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Se procedió analizar las inercias de los elementos:

$I^*m_1, I^*m_2, I^*m_3, I^*m_4, I^*m_5, I^*m_5, I^*m_6, I^*m_7$

3.4.3. Análisis dinámico

3.4.3.1. Análisis de posición

Basándonos en las condiciones iniciales de la antropometría humana de posición se tiene la configuración siguiente del mecanismo.

Tabla 6-3 : Medidas del bipedestador

Medidas del bipedestador	
AC	555 mm
AD	95 mm
DG	555 mm
CG	95 mm
DE	225 mm
DO	317.5 mm
OP	65 mm
Ángulo Delta	68 °

Fuente: Herrera 2020

Realizado por: Camacho Michelle 2022

La posición permite identificar los ángulos y desplazamientos del mecanismo de 4 barras.

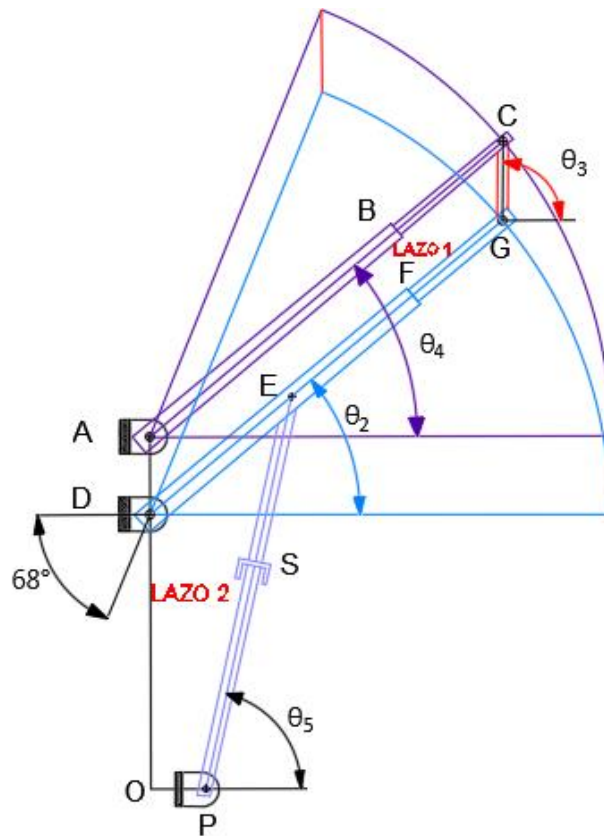


Figura 10-3. Análisis de posición método gráfico.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Tabla 7-3 : Posiciones gráficas

Medidas del bipedestador	
AC	555 mm
AD	95 mm
DG	555 mm
CG	95 mm
DE	225 mm
DO	317.5 mm
OP	65 mm
Ángulo Delta	68 °
θ_2	40°
θ_3	90
θ_4	40°
θ_5	77.15°
S	474.5 mm

Fuente: Herrera 2020

Realizado por: Camacho Michelle 2022

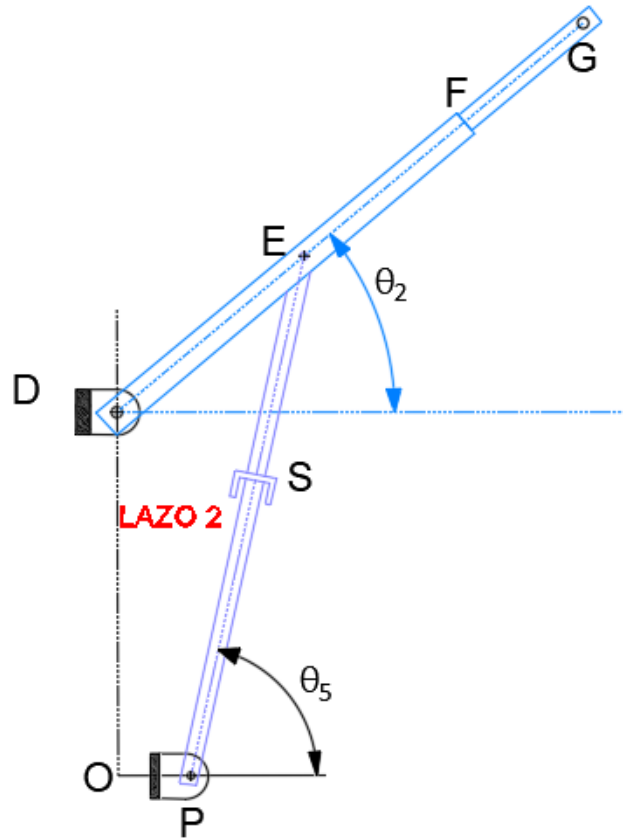


Figura 11-3. Análisis de posición.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Se realiza un análisis vectorial del mecanismo bipedestador.

$$\overline{OP} + \overline{PE} = \overline{OD} + \overline{DE} \quad (11)$$

$$\overline{OP}e^{i\theta_0} + \overline{PE}e^{i\theta_5} = \overline{OD}e^{i\theta_{90}} + \overline{DE}e^{i\theta_2} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} OP (\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) + PE (\cos \theta_3 + i \sin \theta_3) \\ = OD (\cos \theta_1 + i \sin \theta_1) + DE (\cos \theta_4 + i \sin \theta_4) \end{aligned} \quad (13)$$

Las variables serán:

$$\theta_2, \theta_5, s \quad (14)$$

El sistema de ecuaciones de la posición es

$$F1 = OP \cos 0 + s \cos \theta_5 - OD \cos 90 - DE \cos \theta_2 \quad (15)$$

$$F2 = OP \sin 0 + s \sin \theta_5 - OD \sin 90 - DE \sin \theta_2 \quad (16)$$

Se analizará los siguientes puntos y ángulos, con un cambio de posición y velocidad de s correspondiendo al actuador lineal que son los parámetros conocidos del sistema.

Posición DE

El parámetro de control principal está basado en el ángulo θ_2

$$DE_x = DE \cos \theta_2 \quad (17)$$

$$DE_y = 527.5 + DE \sin \theta_2 \quad (18)$$

Posición DG

El parámetro de control principal está basado en el ángulo θ_2

$$DG = DG \cos \theta_2 \quad (19)$$

$$DG = 527.5 + DG \sin \theta_2 \quad (20)$$

En las gráficas de posición y recorrido que desarrolla el prototipo en su funcionamiento se puede deducir la altura máxima del prototipo alcanzando un valor de 1.15 m.

3.4.3.2. Análisis de velocidad

Los bipedestadores presenten movimientos suaves y lentos en su funcionamiento estructural. Por lo mencionado anteriormente, la velocidad lineal del actuador debe ser aproximadamente $v=8 - 20 \frac{mm}{s}$, esta velocidad se ejerce sobre la estructura del bipedestador, asegurando la ergonomía y confort en el usuario del prototipo (Obando, Fabio; Flores, Tatiana ; Barbero, Jhonny; Ortega 2017).

Las velocidades del mecanismo se basan en la ecuación de velocidad relativa, con la condición de que este vector resultante debe ser perpendicular al eslabón de referencia para cada velocidad.

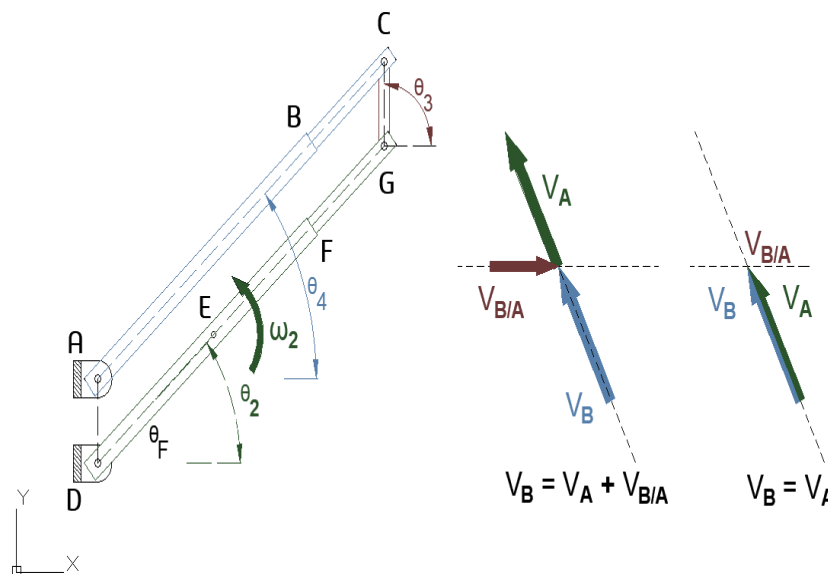


Figura 12-3. Velocidades del lazo 1

Fuente:Herrera 2020

Se obtiene las siguientes velocidades:

Tabla 8-3: Velocidades del sistema.

Velocidades	
ω_2	8.473 deg/s
ω_3	0 rad/s
ω_4	8.473 deg/s
V_A	82.08 mm/s
V_B	82.08 mm/s
$V_{B/A}$	0

Fuente: Herrera 2020

Realizado por: Camacho Michelle 2022

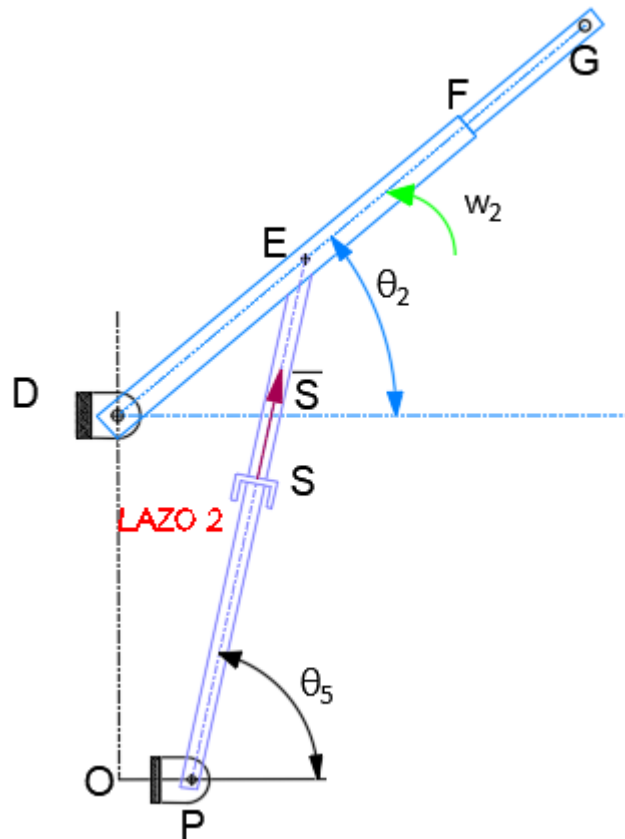


Figura 13-3. Análisis de velocidades del lazo 2 del mecanismo.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Análisis del mecanismo bipedestador con la notación de Euler.

$$\overline{OP} + \overline{PE} = \overline{OD} + \overline{DE} \quad (21)$$

$$\overline{OP}e^{i\theta_0} + \overline{PE}e^{i\theta_5} = \overline{OD}e^{i\theta_{90}} + \overline{DE}e^{i\theta_2} \quad (22)$$

$$OP (\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) + PE (\cos \theta_3 + i \sin \theta_3) = OD (\cos \theta_1 + i \sin \theta_1) + DE (\cos \theta_4 + i \sin \theta_4) \quad (23)$$

Sistema de ecuaciones de la posición

$$F1 = OP \cos 0 + s \cos \theta_5 - OD \cos 90 - DE \cos \theta_2 \quad (24)$$

$$F2 = OP \sin 0 + s \sin \theta_5 - OD \sin 90 - DE \sin \theta_2 \quad (25)$$

Derivamos las funciones

$$F1' = \dot{s} \cos \theta_5 - s \sin \theta_5 \dot{\theta}_5 + DE \sin \theta_2 \dot{\theta}_2 \quad (26)$$

$$F2' = \dot{s} \sin \theta_5 + s \cos \theta_5 \dot{\theta}_5 - DE \cos \theta_2 \dot{\theta}_2 \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} DE \sin \theta_2 & -s \sin \theta_5 \\ -DE \cos \theta_2 & s \cos \theta_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{s} \cos \theta_5 \\ -\dot{s} \sin \theta_5 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Definimos variables

$$\theta_2, \theta_5, s, \dot{s} \quad (29)$$

Velocidad DG

El parámetro de control principal está basado en el ángulo θ_2 y la velocidad del actuador lineal de $20 \frac{mm}{s}$.

$$vx = -DG \sin \theta_2 \dot{\theta}_2 \quad (30)$$

$$vy = DG \cos \theta_2 \dot{\theta}_2 \quad (31)$$

$$vDG = \sqrt{vx^2 + vy^2} \quad (32)$$

La configuración cinemática del mecanismo de cuatro barras es detallada en los lazos de control de forma simétrica, al tener las mismas curvas de velocidades lineales y angulares su punto más alto analizar es de $140 \frac{mm}{s}$.

3.4.3.3. Análisis de aceleraciones

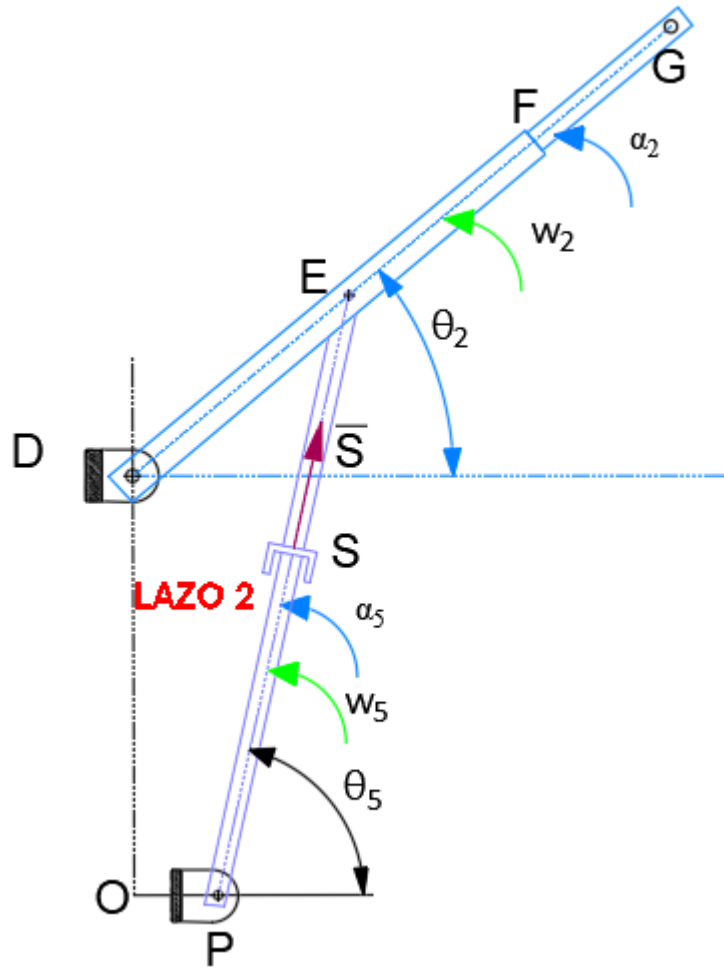


Figura 14-3. Análisis de aceleraciones

Realizado por: Camacho Michelle 2022

El sistema de ecuaciones de la posición

$$F1 = OP \cos 0 + s \cos \theta_5 - OD \cos 90 - DE \cos \theta_2 \quad (33)$$

$$F2 = OP \sin 0 + s \sin \theta_5 - OD \sin 90 - DE \sin \theta_2 \quad (34)$$

Derivamos las funciones

$$F1' = \dot{s} \cos \theta_5 - s \sin \theta_5 \dot{\theta}_5 + DE \sin \theta_2 \dot{\theta}_2 \quad (35)$$

$$F2' = \dot{s} \sin \theta_5 + s \cos \theta_5 \dot{\theta}_5 - DE \cos \theta_2 \dot{\theta}_2 \quad (36)$$

Segunda derivada de las funciones

$$F1'' = \ddot{s} \cos \theta_5 - \dot{s} \sin \theta_5 \dot{\theta}_5 - \dot{s} \sin \theta_5 \dot{\theta}_5 - s \cos \theta_5 \dot{\theta}_5^2 - s \sin \theta_5 \ddot{\theta}_5 + DE \cos \theta_2 \dot{\theta}_2^2 + DE \sin \theta_2 \ddot{\theta}_2 \quad (37)$$

$$F2'' = \ddot{s} \sin \theta_5 + \dot{s} \cos \theta_5 \dot{\theta}_5 + \dot{s} \cos \theta_5 \dot{\theta}_5 - s \sin \theta_5 \dot{\theta}_5^2 + s \cos \theta_5 \ddot{\theta}_5 + DE \sin \theta_2 \dot{\theta}_2^2 - DE \cos \theta_2 \ddot{\theta}_2 \quad (38)$$

$$F1'' = -2\dot{s} \sin \theta_5 \dot{\theta}_5 - s \cos \theta_5 \dot{\theta}_5^2 - s \sin \theta_5 \ddot{\theta}_5 + DE \cos \theta_2 \dot{\theta}_2^2 + DE \sin \theta_2 \ddot{\theta}_2 \quad (39)$$

$$F2'' = 2\dot{s} \cos \theta_5 \dot{\theta}_5 - s \sin \theta_5 \dot{\theta}_5^2 + s \cos \theta_5 \ddot{\theta}_5 + DE \sin \theta_2 \dot{\theta}_2^2 - DE \cos \theta_2 \ddot{\theta}_2 \quad (40)$$

$$\begin{bmatrix} DE \sin \theta_2 & -s \sin \theta_5 \\ -DE \cos \theta_2 & s \cos \theta_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\dot{s} \sin \theta_5 \dot{\theta}_5 + s \cos \theta_5 \dot{\theta}_5^2 - DE \cos \theta_2 \dot{\theta}_2^2 \\ -2\dot{s} \cos \theta_5 \dot{\theta}_5 + s \sin \theta_5 \dot{\theta}_5^2 - DE \sin \theta_2 \dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix} \quad (41)$$

Aceleración DG

$$ax = -DG \cos \theta_2 \dot{\theta}_2^2 - DG \sin \theta_2 \ddot{\theta}_2 \quad (42)$$

$$ay = -DG \sin \theta_2 \dot{\theta}_2^2 + DG \cos \theta_2 \ddot{\theta}_2 \quad (43)$$

$$vDG = \sqrt{vx^2 + vy^2} \quad (44)$$

Las aceleraciones del mecanismo tendrán un valor máximo de $70 \frac{mm}{s^2}$.

3.4.4. Análisis cinemático

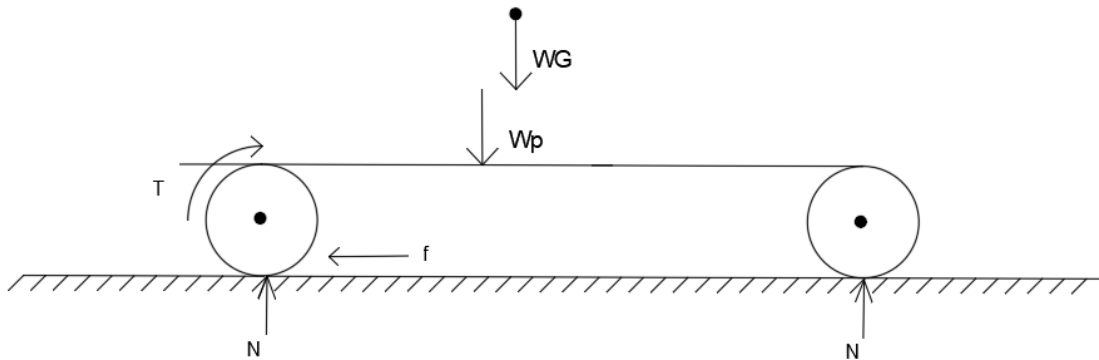


Figura 15-3. Esquema para el desplazamiento

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Se analizó:

Momento generado por el motor

$$T = F_M * r$$

F_M : es la fuerza motriz

r : es el radio

Fuerza de rozamiento generada en el sistema

$$f = \mathcal{M} * N$$

\mathcal{M} : factor de rozamiento

N : Normal

Sumatoria de fuerzas en Y

$$\sum F_y = 0$$

$$W_G + W_p = 2N$$

$$N = \frac{W_G + W_p}{2}$$

Sumatoria de fuerzas en x

$$\sum F_x = m * a$$

$$F_M + 2f = m * a_x$$

$$\text{Donde } f = \mathcal{M} * N$$

$$F_M + 2\mathcal{M} * N = m * a_x$$

La variable de interés (T)

$$F_M = m * a_x - 2\mathcal{M} * N$$

$$\text{Donde } F_M = \frac{T}{r}$$

$$\frac{T}{r} = m * a_x - 2\mathcal{M} * m * g$$

$$T = m * r(a_x - 2\mathcal{M} * g)$$

Tm efs

$$Tm = f * \frac{100}{e} T$$

$$Tm = f * \frac{100}{e} * m * r(a_x - 2\mathcal{M} * g)$$

3.4.5. Análisis en plano inclinado

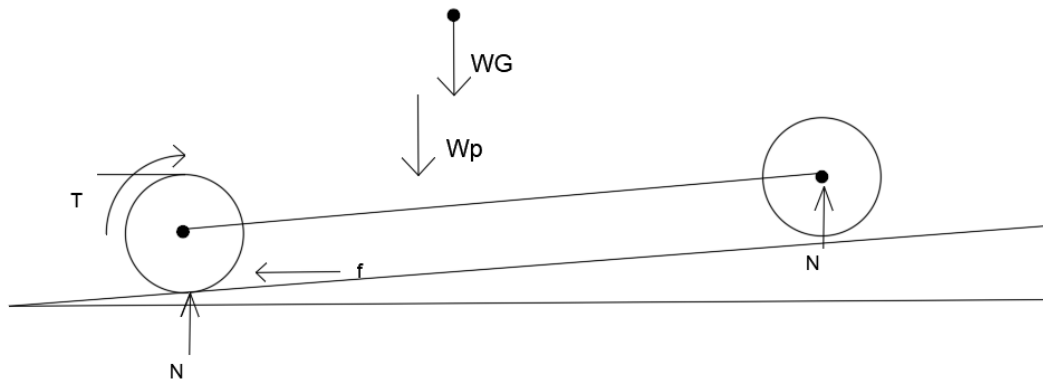


Figura 16-3. Esquema para un plano inclinado

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Sumatoria de fuerzas en Y

$$\sum Fy = 0$$

$$W_G * \cos \phi + W_p \cos \phi = 2N$$

$$N = \frac{(W_G + W_p) * \cos \phi}{2}$$

Sumatoria de fuerzas en x

$$\sum Fx = m * a$$

$$F_M + 2f + m * g * \sin \phi = m * a_x$$

La variable de interés (T)

$$F_M = m * a_x - 2\mathcal{M} * N - m * g * \sin \phi$$

Donde $F_M = \frac{T}{r}$

$$\frac{T}{r} = m * a_x - 2\mathcal{M} * m * g - m * g * \sin \phi$$

$$T = m * r(a_x - 2\mathcal{M} * g - g * \sin \phi)$$

Tm efs

$$Tm = f * \frac{100}{e} T$$

$$Tm = f * \frac{100}{e} * m * r(a_x - 2\mathcal{M} * g - g * \sin \phi)$$

3.5. Bond Graph de la silla bipestadora

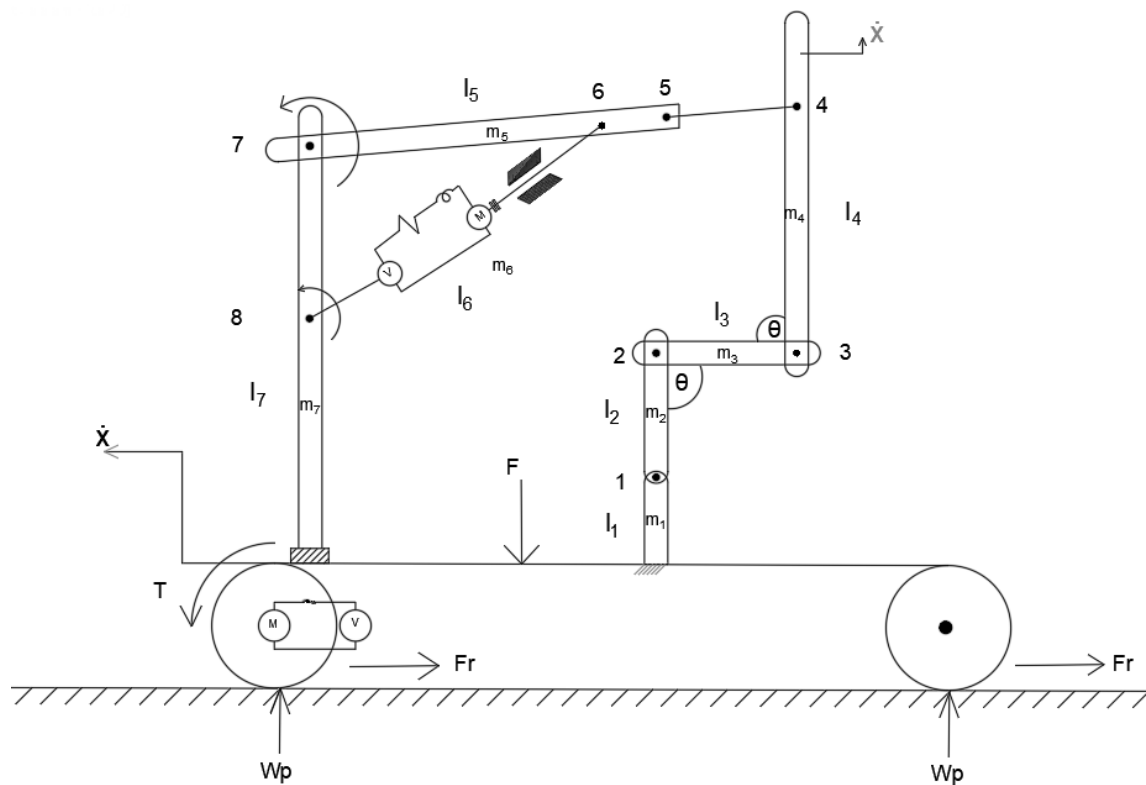


Figura 17-3. Elementos del sistema silla de ruedas bipestadora.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

3.5.1.MTF en 20- SIM

Este modelo representa un transformador modulado ideal. El modelo representa una relación de potencia continua entre los esfuerzos y flujos de ambos puertos. La relación de transformación se puede establecer en un cierto valor (fluctuante), dado por una señal de entrada. La causalidad siempre es mixta:

un puerto tiene un esfuerzo de causalidad mientras que el otro tiene un flujo de causalidad

$$p1.e = entrada * p2.e;$$

$$p2.f = entrada * p1.f;$$

o:

$$p2.e = 1 / entrada * p1.e;$$

$$p1.f = 1 / entrada * p2.f;$$

Interfaces

Puertos

p1, p2

Descripción

Puerto de entrada y salida del transformador.

Causalidad

p1 nota igual p2

Entradas

Aporte

Relación de transformación modulada.

3.5.2. Ruedas

Para poder modelar las ruedas, será necesario estudiar las fuerzas que actúan sobre cada una de ellas en las tres direcciones. La rueda consistirá en un resorte unido a una inercia y a una fuente de esfuerzo que simularán respectivamente su compresibilidad, su masa y su peso propio.

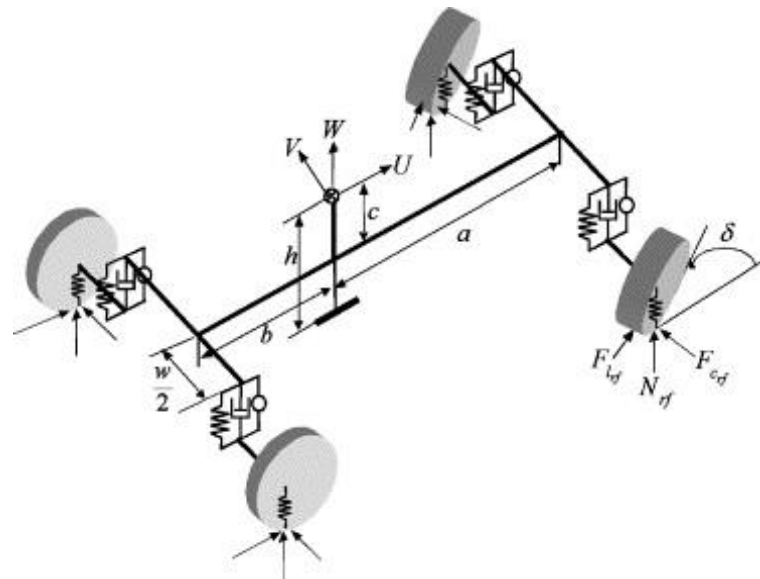


Figura 18-3. Representación de un sistema de ruedas

Fuente: Cellier 2001

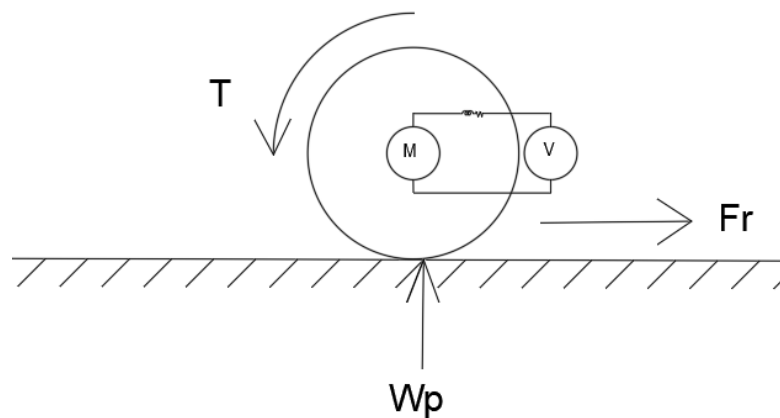


Figura 19-3. Diagrama de una rueda y sus fuerzas

Realizado por: Camacho Michelle 2022

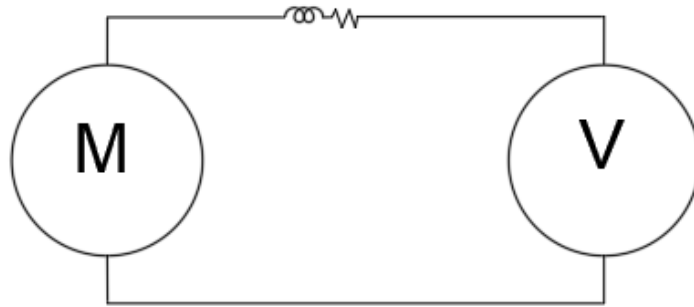


Figura 20-3. Representación del motor en la rueda de la silla de ruedas

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Para la realización del Bond Graph de la rueda se procedió hacer un esquema del modelo de la rueda de la silla de ruedas ,respectivamente con sus masa ,fuerzas analizar y inercia.

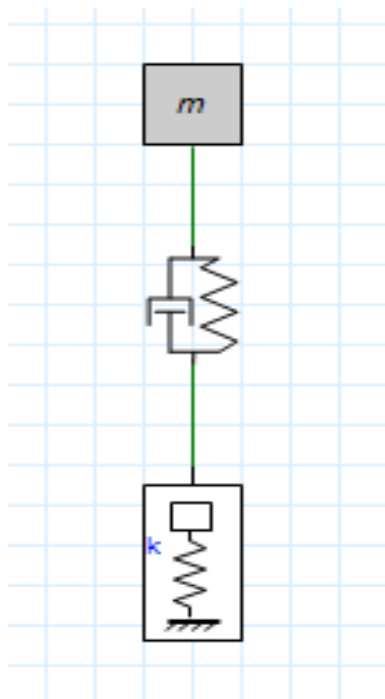


Figura 21-3. Modelo de una rueda

Realizado por: Camacho Michelle 2022

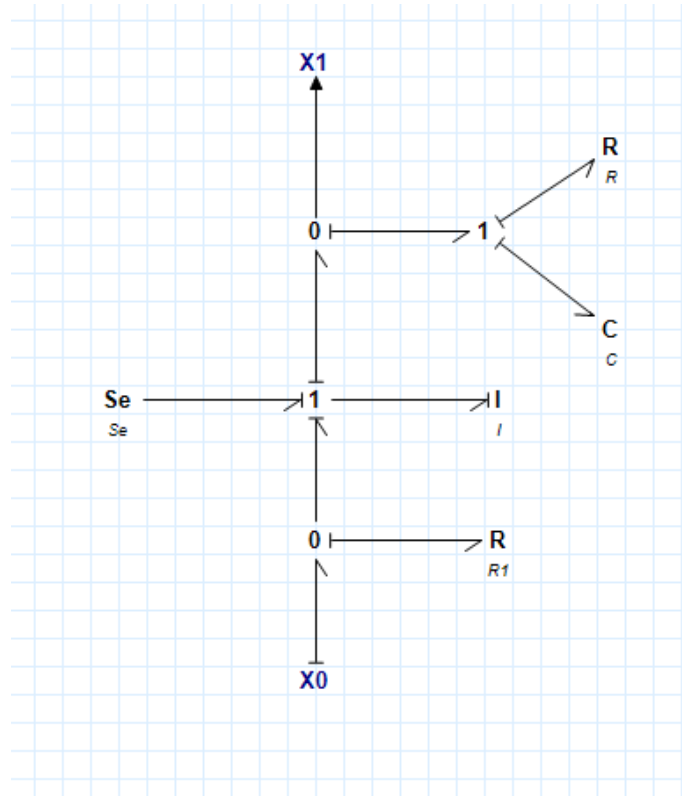


Figura 22-3. Bond Graph para la rueda

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Ecuaciones encontradas :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c}{m} & \frac{C}{M} & K_1 & K \\ \frac{c}{m} & -\frac{C}{M} & 0 & K \\ -\frac{1}{m} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{m} & -\frac{1}{m} & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -m * g \\ -M * g \\ V_0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Es así que:

p_1 cantidad de movimiento en M.

p_2 cantidad de movimiento en m.

x_1 desplazamiento en el neumático.

x_2 desplazamiento en el amortiguador y resorte.

V_0 es la velocidad sobre el neumático a partir de un bache.

k , k_R coeficientes de rigidez (chasis y neumático, respectivamente).

C coeficiente de amortiguación

3.5.3. Actuador lineal

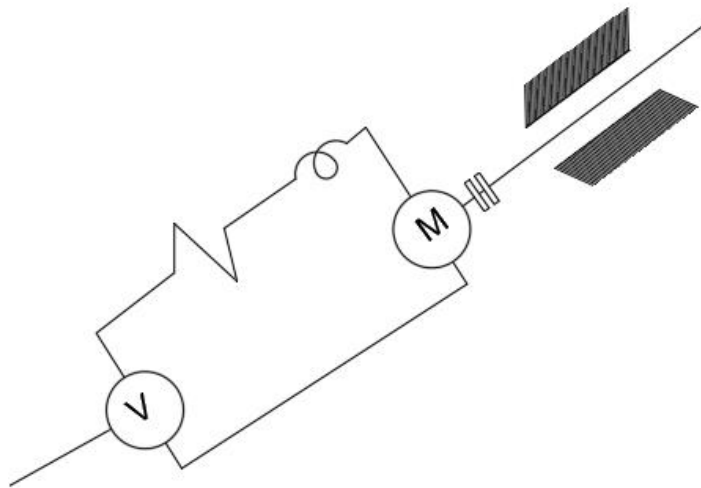


Figura 23-3. Representación del actuador lineal para el análisis de Bond Graph

Realizado por: Camacho Michelle 2022

La precisión del funcionamiento de la máquina depende significativamente del rendimiento del controlador del actuador lineal. El propósito de la máquina es seguir las trayectorias geométricas deseadas de la manera más rápida y precisa posible (Moten, S; Pipeleers, G; Swevers, J; Desmet 2014).

Los elementos del actuador lineal a representar para el análisis de Bond Graph son:

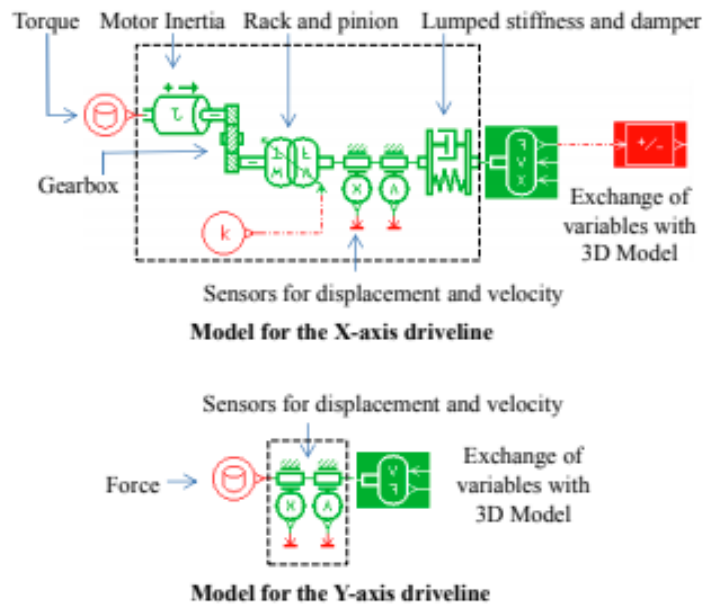


Figura 24-3. Representación de los elementos del actuador lineal en Bond Graph

Fuente: Moten, S.; Pipeleers, G.; Swevers, J.; Desmet 2014

Se ha elegido un esquema en cascada con los controladores P (proporcional) y PI (proporcional-integral) para los bucles de posición y velocidad, respectivamente, junto con la velocidad y la aceleración de avance. El control en cascada es muy común en la industria de las máquinas, (ii) en la actualidad, este esquema se implementa en el Bond Graph.

Para comparar el rendimiento de circuito cerrado de la máquina real y el modelo virtual, los parámetros del controlador ajustados al prototipo físico se utilizan para el modelo virtual.

Los controladores para los accionamientos de los ejes X e Y están conectados a los correspondientes modelos de línea de accionamiento (Moten, S.; Pipeleers, G.; Swevers, J.; Desmet 2014).

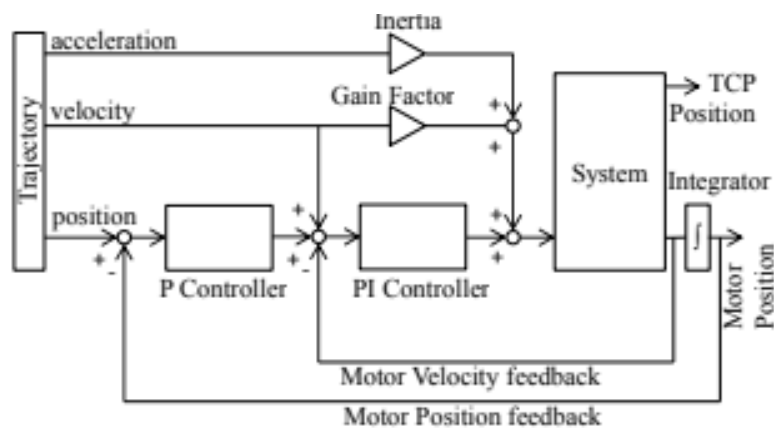


Figura 25-3. Esquema del controlador en cascada

Fuente: Moten, S.; Pipeleers, G.; Swevers, J.; Desmet 2014

3.5.4. Bond Graph para el brazo DG con respecto a la posición

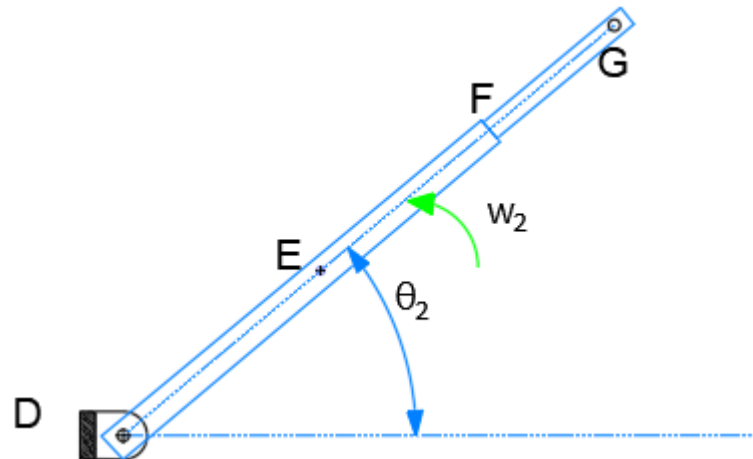


Figura 26-3. Eslabón del brazo DG .

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Usando la causalidad del comando MTF del programa 20-SIM se estableció el bond graph del brazo DG tomando en cuenta las posiciones, velocidades y aceleraciones del mismo. Para lo cual se realizaron los siguientes pasos:

1. Se identificó una Junction 0 (Anexo A) por cada velocidad angular presente en el sistema rotacional.
2. Elaboramos una gráfica simplificada del sistema traslacional (Anexo B).
3. Para colocar los MTF tomamos en cuenta que un puerto tiene un esfuerzo de causalidad mientras que el otro tiene un flujo de causalidad.
4. Se coloca una Junction 0 (Anexo A) para la diferencia existente entre las velocidades angulares de los eslabones.
5. Relacionar los elementos que experimentan esas velocidades.

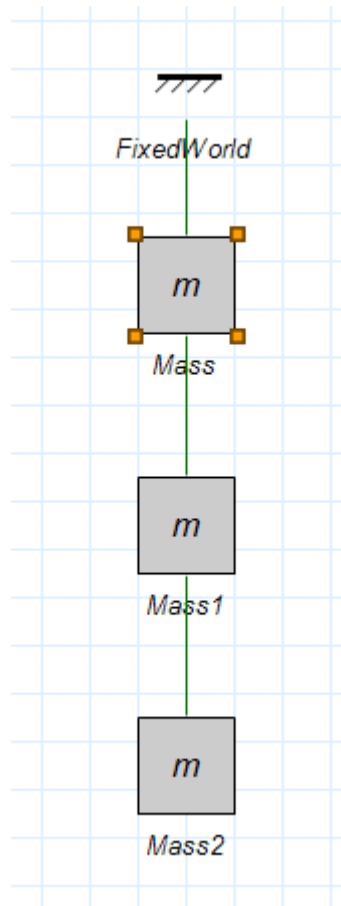


Figura 27-3. Esquema traslacional del brazo DG en 20-SIM

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Para el Bond Graph se toma en cuenta:

1. Los puertos de entrada representan la posición de los eslabones DE y EG, los puertos de salida son DEy, DGy, DGx y DEx.
2. La junction 0 representan la velocidad angular w_2 , w_3 , w_6 y w_7 .
3. La junction 1 representan la diferencia de velocidad angular w_2 , w_3 , w_6 y w_7 .
4. Analizamos los elementos en el sistema.

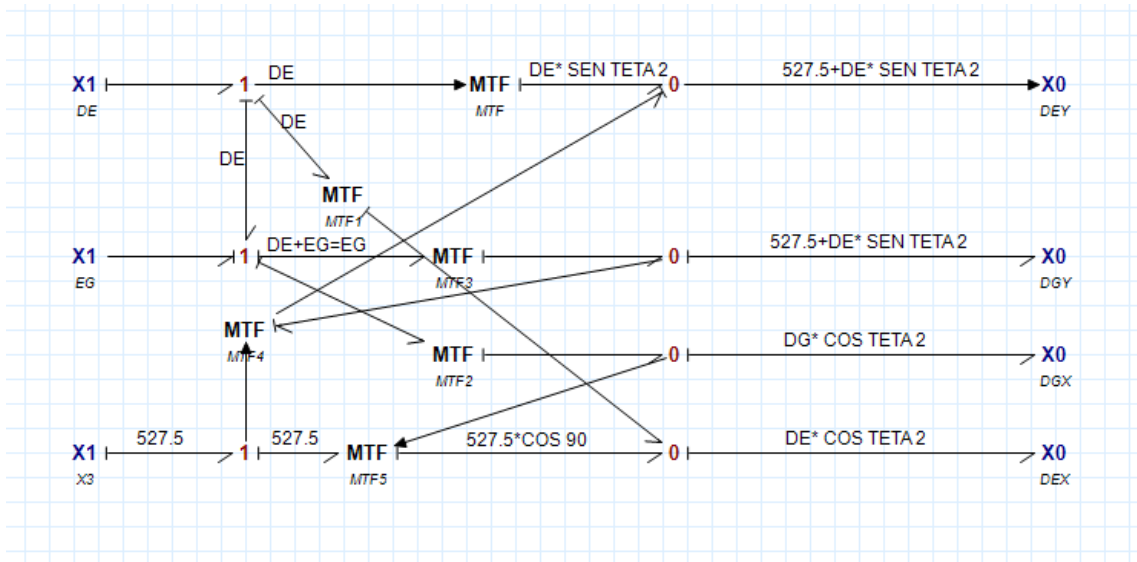


Figura 28-3. Esquema del brazo DG

Realizado por: Camacho Michelle 2022

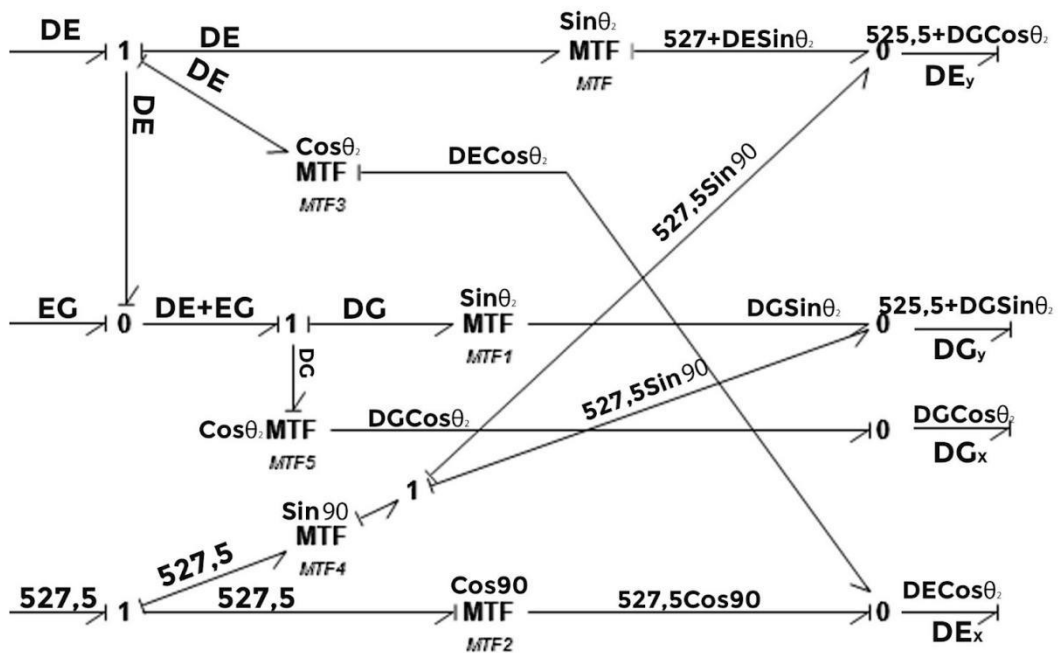


Figura 29-3. Bond Graph posición DE y DG

Realizado por: Camacho Michelle 2022

3.5.5. Bond Graph para el brazo PS con respecto a la posición

Para este brazo debemos tomar en cuenta:

$$F_2 = Fy = -317.5 + S * \sin \phi_5 - DE * \sin \phi_2$$

$$F_1 = FX = 65 + S * \cos \phi_5 - DE * \cos \phi_2$$

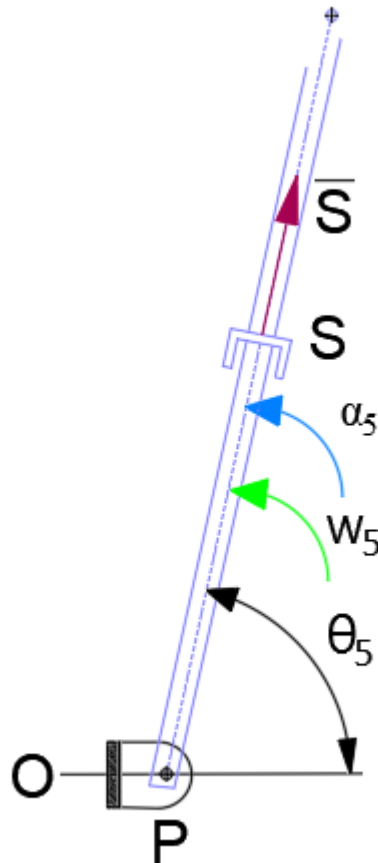


Figura 30-3. Eslabón del brazo PS.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Usando la causalidad del comando MTF del programa 20-SIM se estableció el bond graph del brazo DG tomando en cuenta las posiciones, velocidades y aceleraciones del mismo. Para lo cual se realizaron los siguientes pasos:

1. Se identificó una Junction 0 (Anexo A) por cada velocidad angular presente en el sistema rotacional.
2. Elaboramos una gráfica simplificada del sistema traslacional (Anexo B).
3. Para colocar los MTF tomamos en cuenta que un puerto tiene un esfuerzo de causalidad mientras que el otro tiene un flujo de causalidad.

4. Se coloca una Junction 0 (Anexo A) para la diferencia existente entre las velocidades angulares de los eslabones.
5. Relacionar los elementos que experimentan esas velocidades.

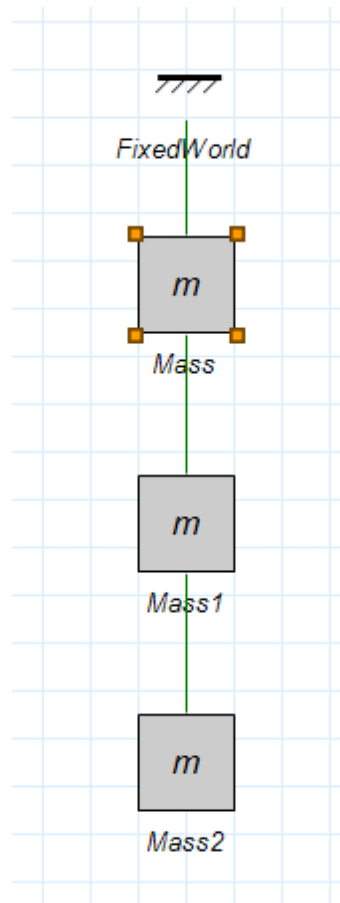


Figura 31-3. Esquema del brazo PS en 20-SIM

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Para el Bond Graph se toma en cuenta:

1. Los puertos de entrada representan la posición de los eslabones DE y S, los puertos de salida son F_y y F_x .
2. La junction 0 representan la velocidad angular w_5 y w_6 .
3. La junction 1 representan la diferencia de velocidad angular w_5 y w_6 .
4. Analizamos los elementos en el sistema.

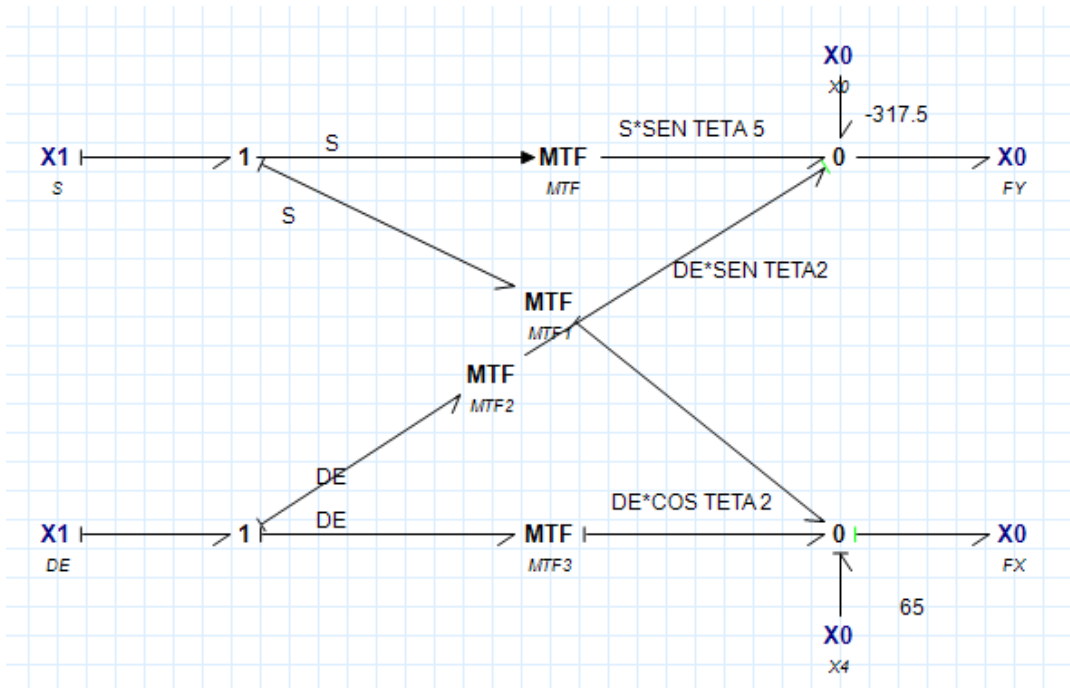


Figura 32-3. Esquema del brazo PS

Realizado por: Camacho Michelle 2022

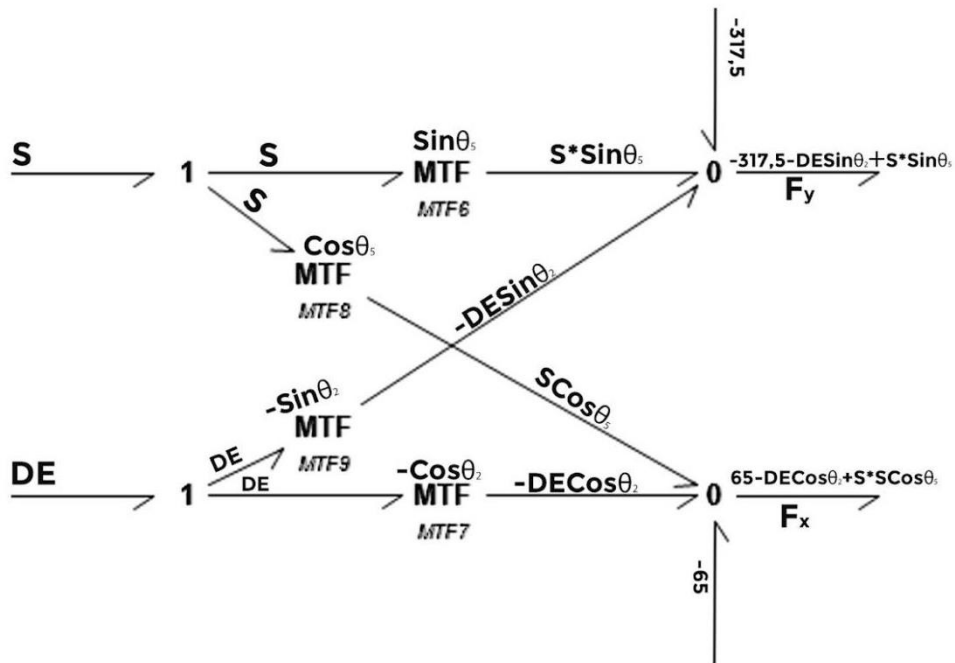


Figura 33-3. Bond Graph del brazo PS con respecto a DE

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Bond Graph del lazo 2

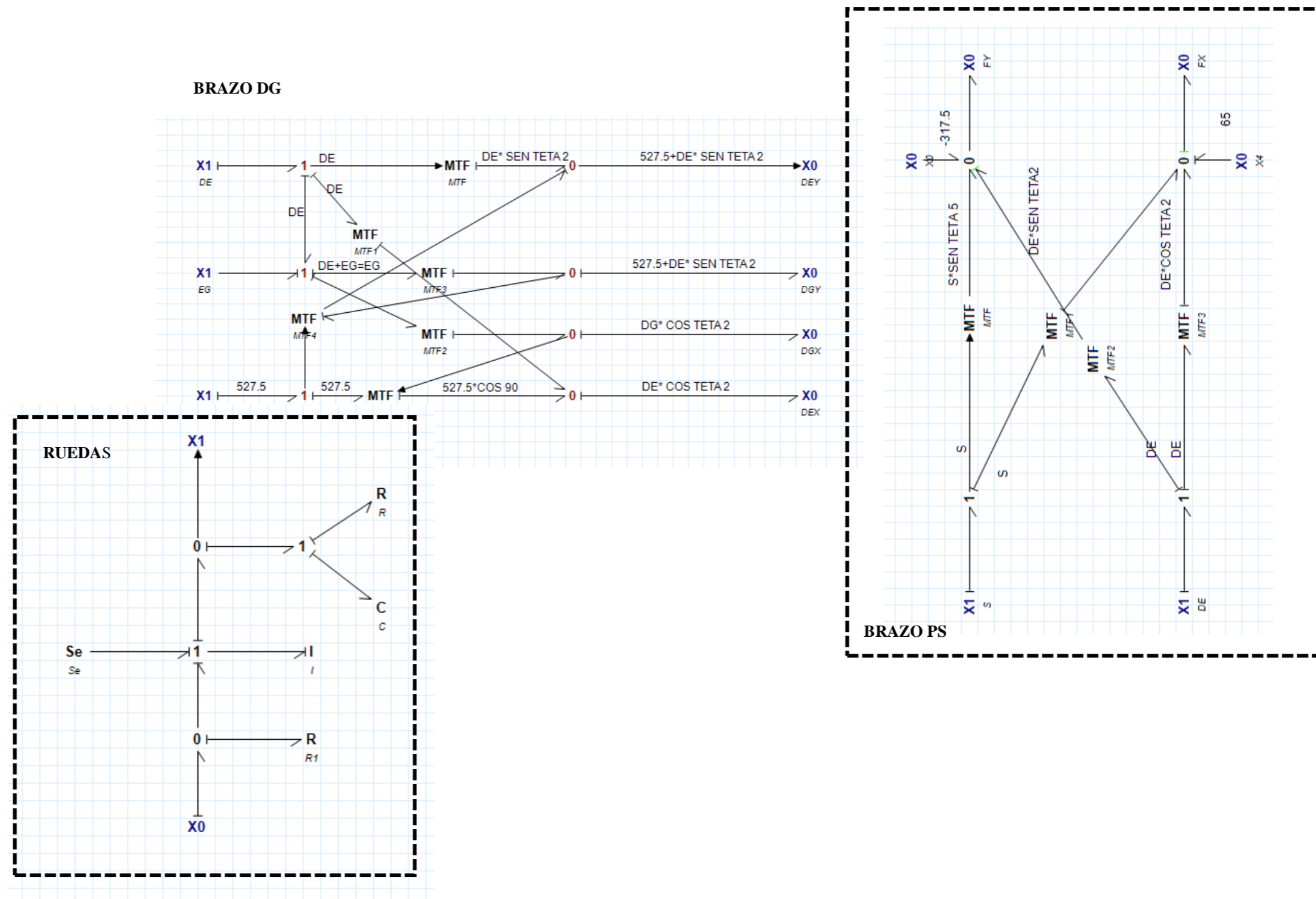


Figura 34-3. Bond Graph de posiciones del sistema de silla bipedestadora .

Realizado por: Camacho Michelle 2022

3.5.6. Análisis por pasadores

Se realizó otro análisis en el que nos basamos en las velocidades, desplazamientos y velocidad angular existentes en el lazo.

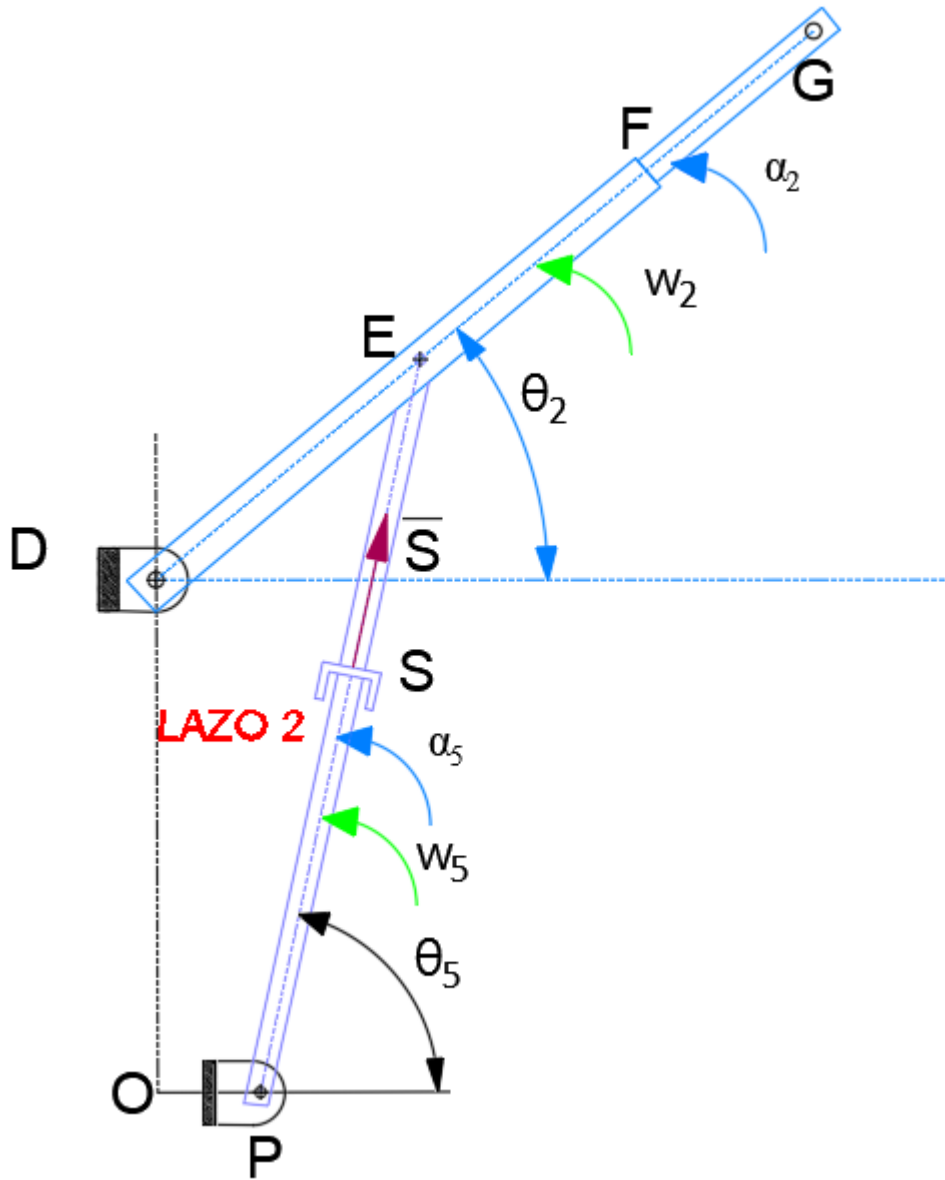


Figura 35-3. Lazo del mecanismo analizar (Lazo 2) .

Realizado por: Camacho Michelle 2022

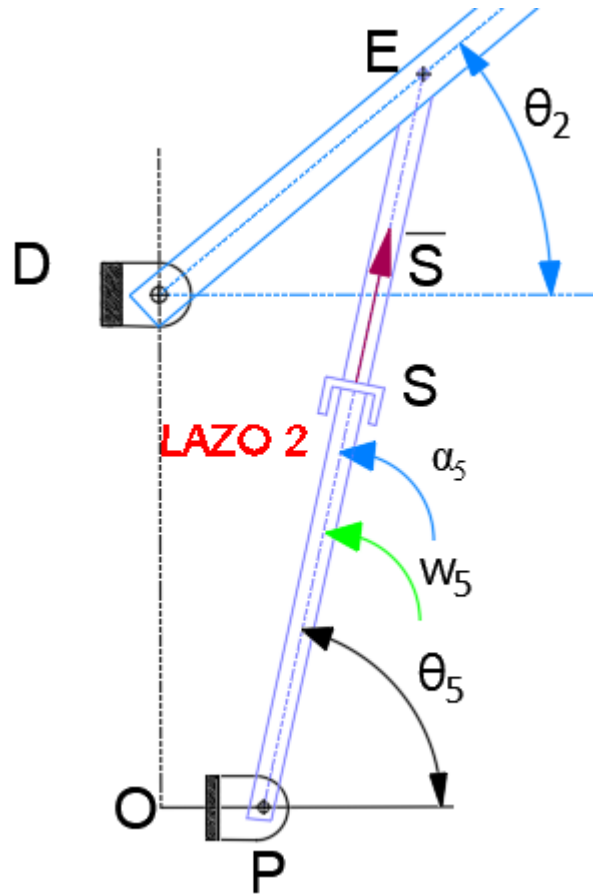


Figura 36-3. Pasadores de análisis.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Analizamos el desplazamiento en el eslabón PE en el que tenemos un desplazamiento entre los puntos s y \hat{s} , la velocidad relativa entre estos puntos será:

$$v_{\hat{s}} - v_s = \text{Desplazamiento} * w_5$$

$$w_{5\hat{s}} = w_{5s} = w_5$$

Desplazamiento

$$\int (v_{\hat{s}} - v_s) dt = \text{distancia del desplazamiento}$$

3.5.6.1. Pasador E

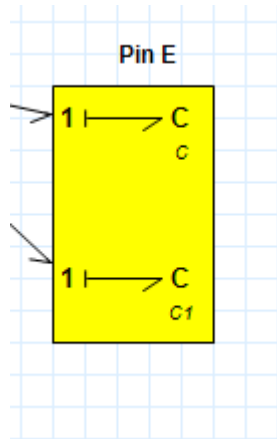


Figura 37-3. Bond Graph para el pasador E.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

3.5.6.2. Pasador F

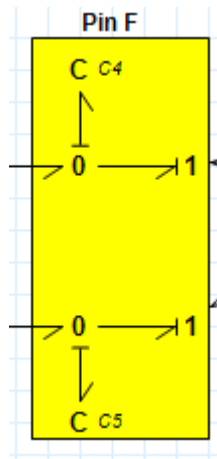


Figura 38-3. Bond Graph para el pasador F.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

3.5.6.3. Pasador D

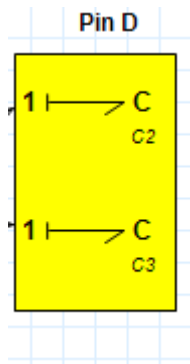


Figura 39-3. Bond Graph para el pasador D.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

3.5.6.4. Transformación de coordenadas

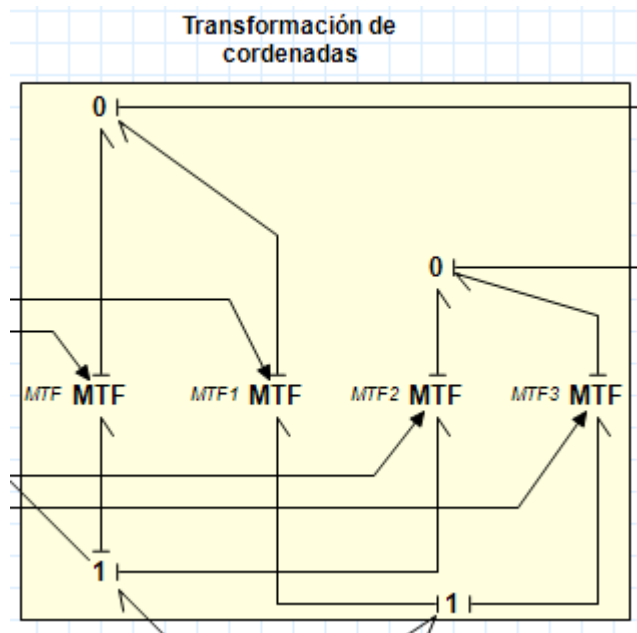


Figura 40-3. Bond Graph para transformación de coordenadas

Realizado por: Camacho Michelle 2022

3.5.6.4. Análisis de desplazamiento

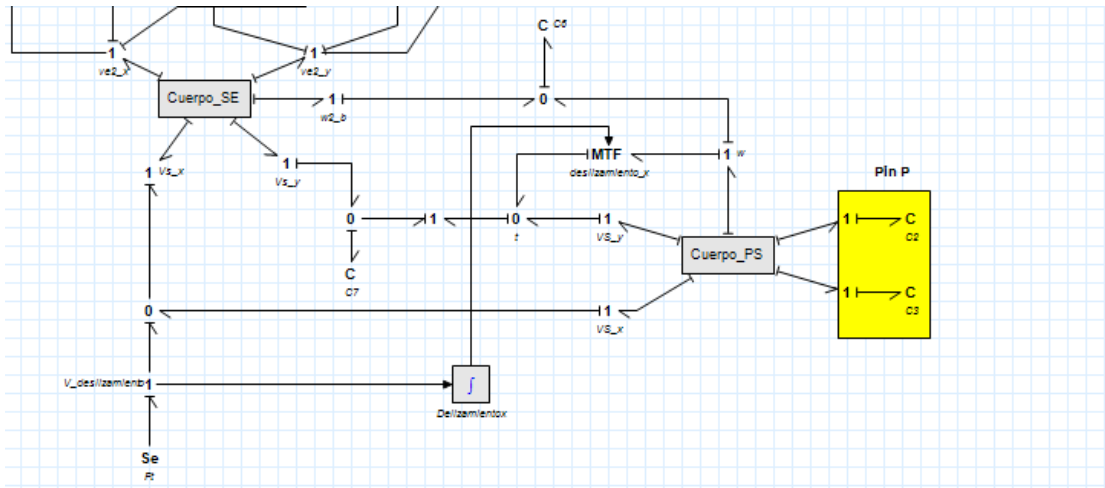


Figura 41-3. Bond Graph para el desplazamiento del lazo 2

Realizado por: Camacho Michelle 2022

3.6. Costos directos

Tabla 9-3: Costos .

DESCRIPCIÓN	COSTO (\$)
Programa 20-Sim para uso personal	300.00
TOTAL	300.00

Realizado por: Camacho Michelle 2022

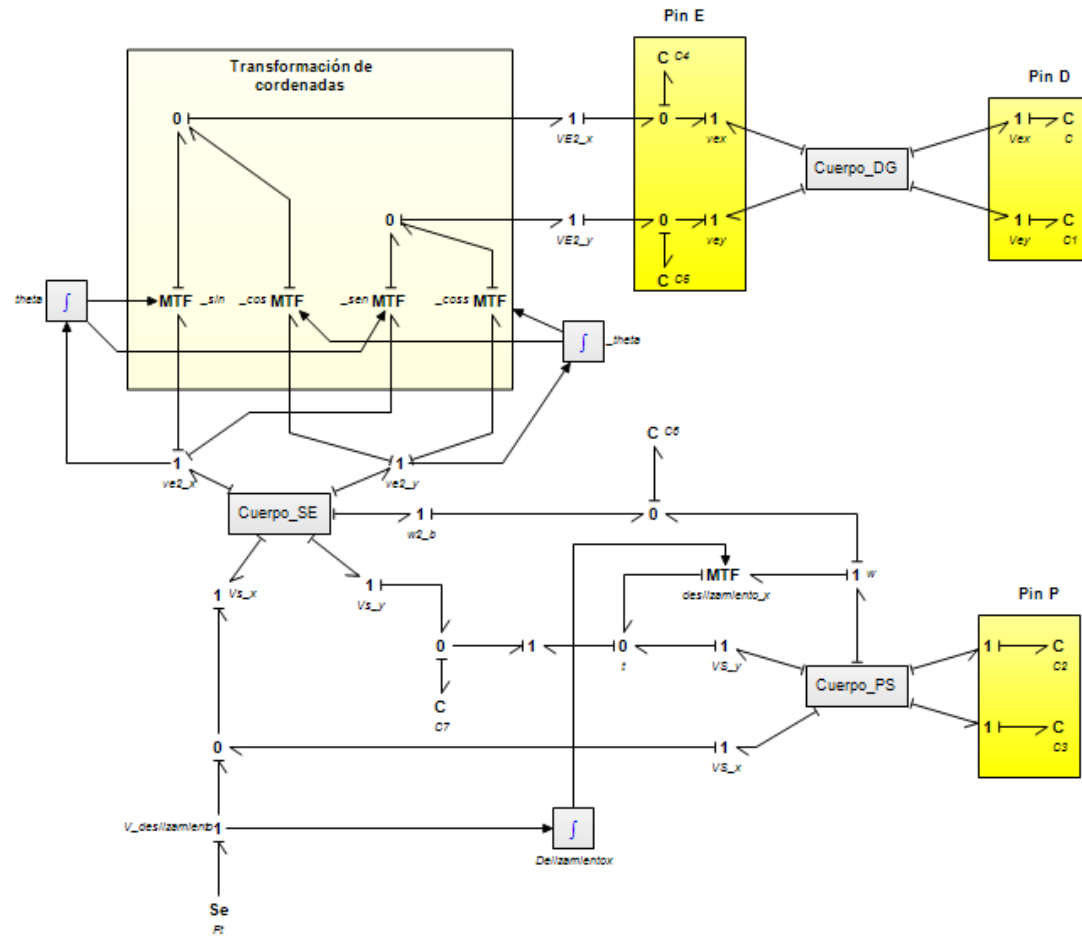


Figura 42-3. Bond Graph general del modelo de 4 barras.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

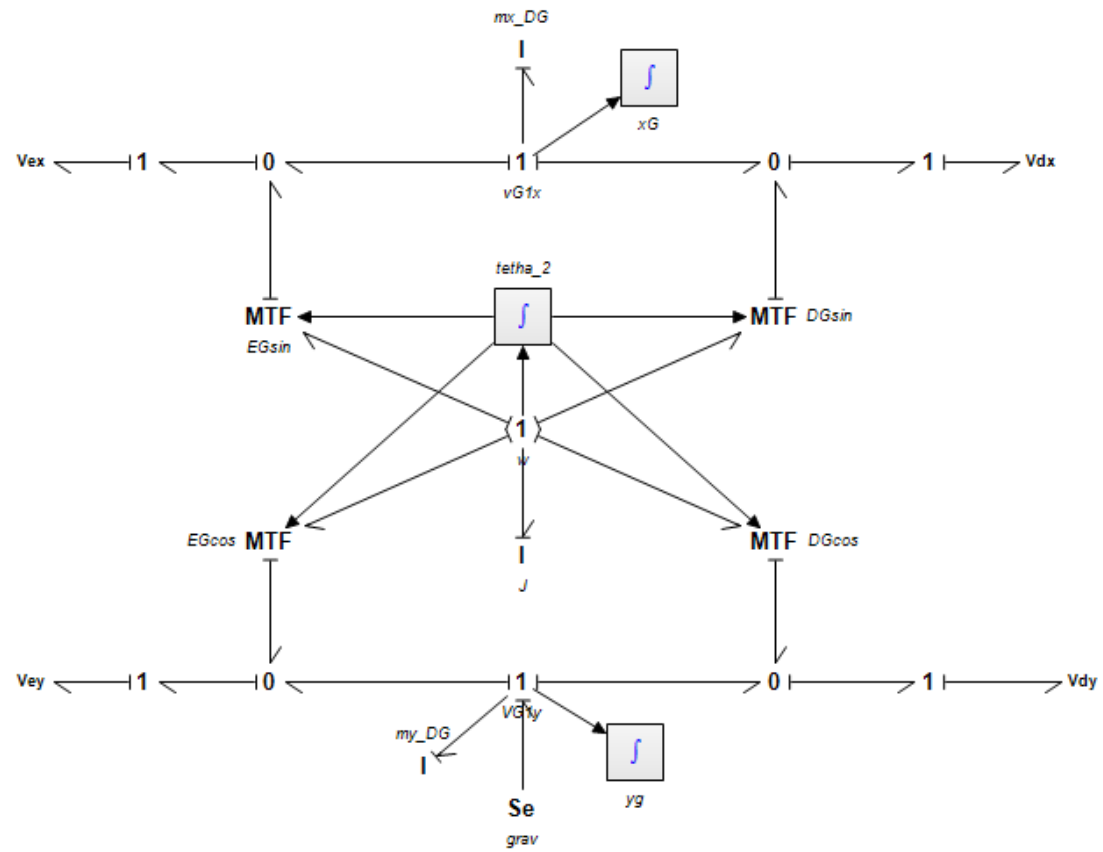


Figura 43-3. Submodelo cuerpo DG

Realizado por: Camacho Michelle 2022

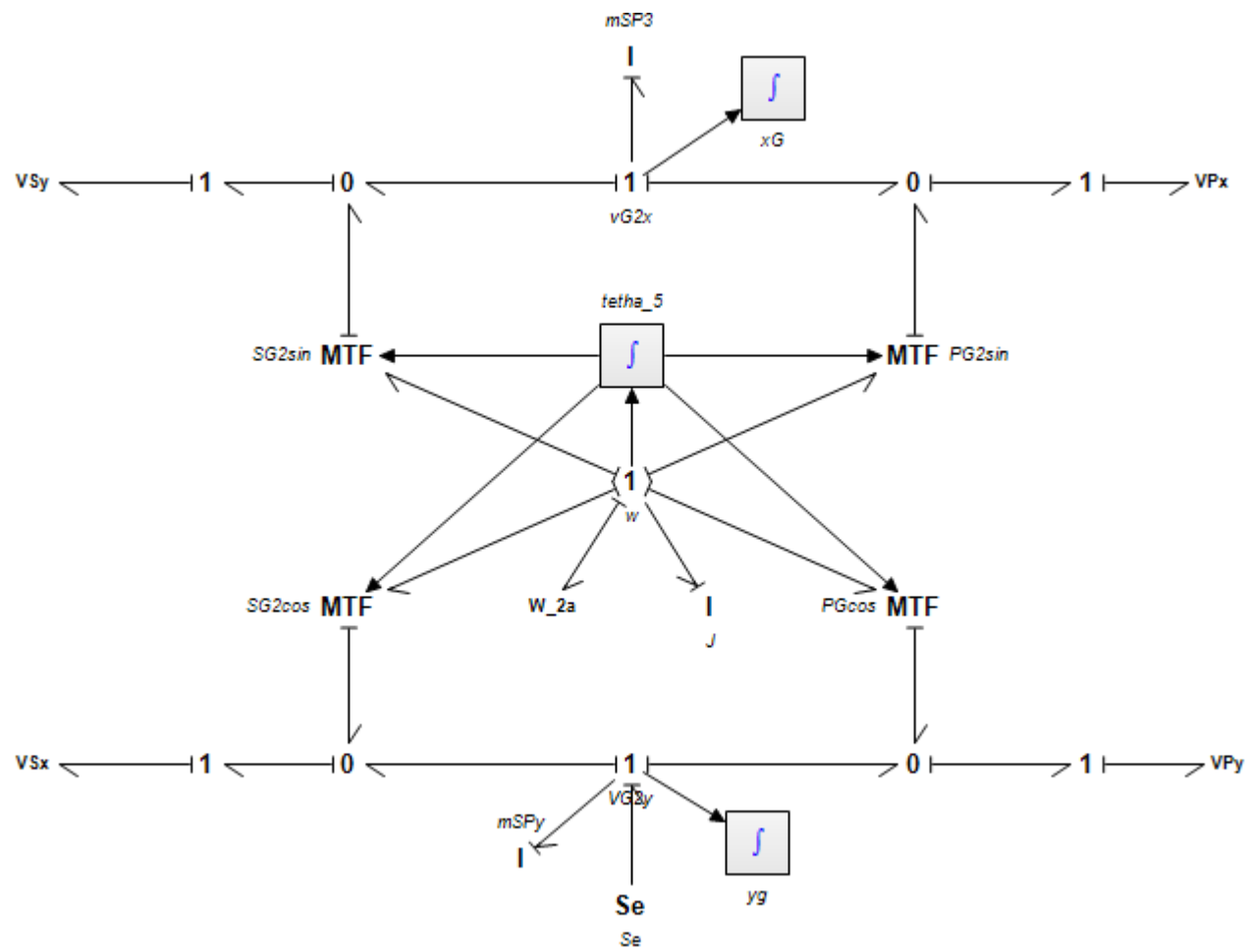


Figura 44-3. Submodelo cuerpo PS.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

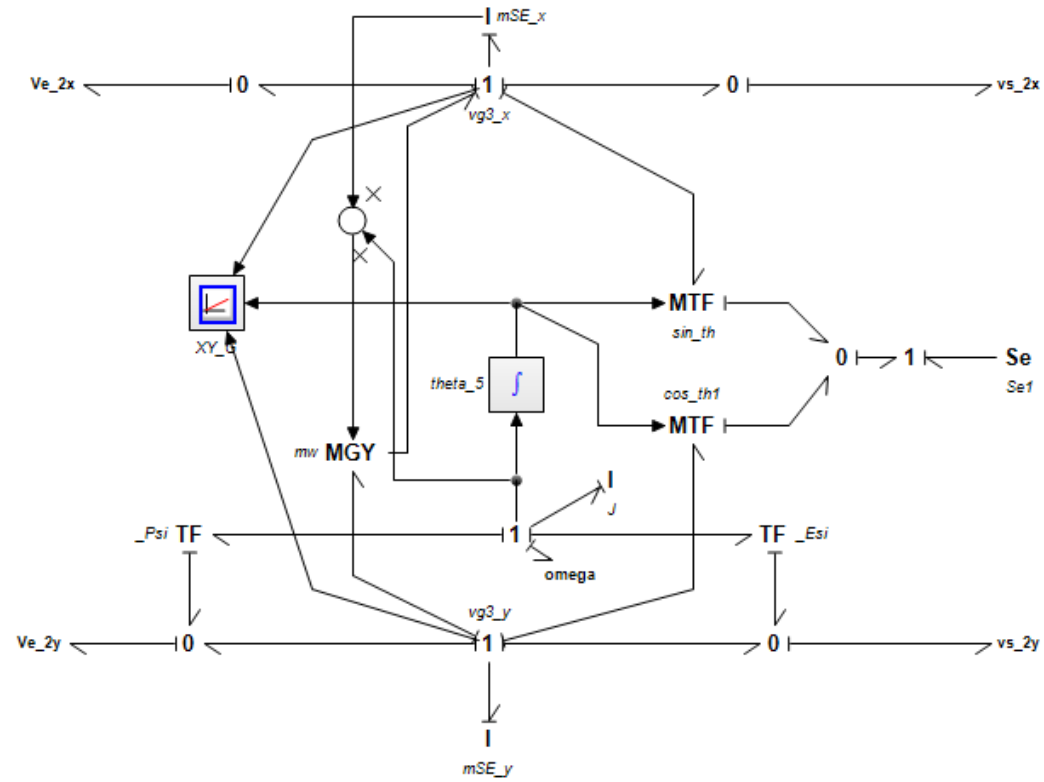


Figura 45-3. Submodelo cuerpo SE

Realizado por: Camacho Michelle 2022

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Simulación en 20-sim

Para la simulación del Bon Graph se analizó el modelo general del cuerpo, es necesario conocer las variables como dimensiones, masas, inercias y condiciones iniciales, para el movimiento. Se subdividió el modelo, en 3 submodelos para obtener mejores resultados, y poder relacionar los puertos en cada eslabón.

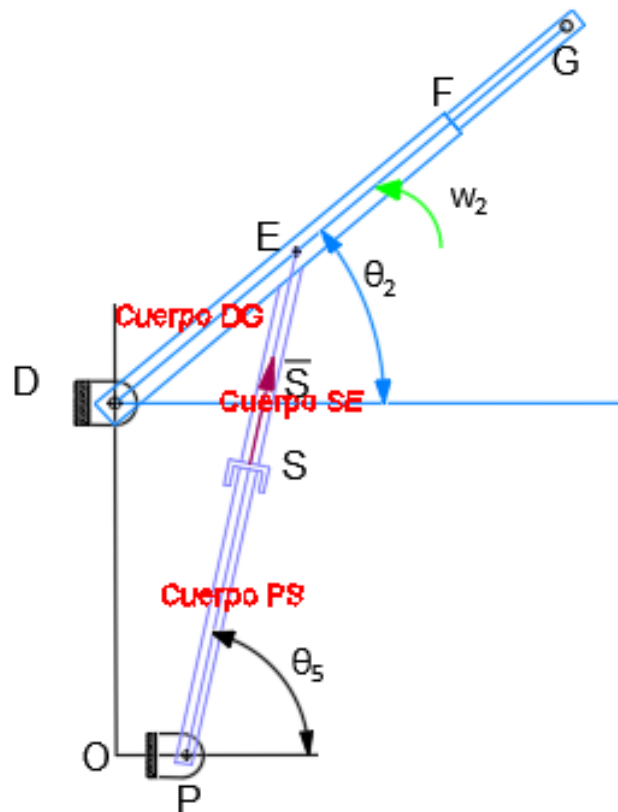


Figura 1-4. Cuerpo original del sistema de la silla de ruedas.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

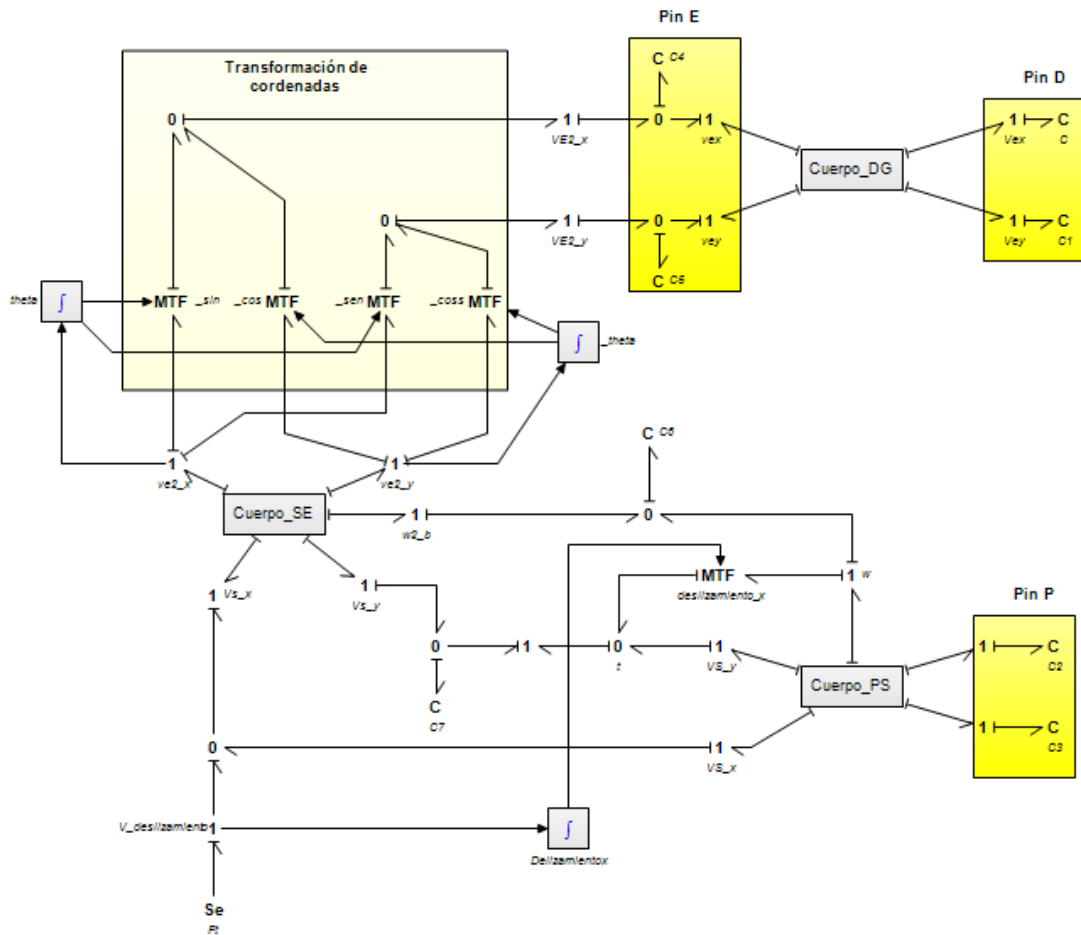


Figura 2-4. Bond Graph general de la silla de ruedas.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Se observa el modelo general del sistema, el cual relaciona el cuerpo SE y PS por un deslizamiento sabiendo que:

$$\int (V_{SEx} - V_{PSx}) dt = \text{deslizamiento}$$

Como sabemos la velocidad relativa de SE y PS será:

$$\begin{aligned} V_{SEx} - V_{PSx} &= X_{\text{deslizamiento}} * \dot{\theta}_5 \\ &= X_{\text{deslizamiento}} * w_5 \end{aligned}$$

$$w_{SE} = w_{PS} = w_5$$

Para la simulación en 20-sim aplicamos las siguientes ecuaciones:

Ecuaciones estáticas

$Cuerpo_DG\backslash grav\backslash p.e = Cuerpo_DG\backslash grav\backslash effort;$
 $Cuerpo_PS\backslash Se\backslash p.e = Cuerpo_PS\backslash Se\backslash effort;$
 $Cuerpo_SE\backslash Se1\backslash p.e = Cuerpo_SE\backslash Se1\backslash effort;$
 $Ft\backslash p.e = Ft\backslash effort;$
 $Cuerpo_SE\backslash OneJunction\backslash p2.e = -Cuerpo_SE\backslash Se1\backslash p.e;$
 $Vs_x\backslash p1.e = -Ft\backslash p.e;$
 $Cuerpo_SE\backslash Psi\backslash p1.e = Cuerpo_SE\backslash Psi\backslash r * Vs_x\backslash p1.e;$

Ecuaciones dinámicas

$C\backslash p.e = C\backslash state / C\backslash c;$
 $C1\backslash p.e = C1\backslash state / C1\backslash c;$
 $C2\backslash p.e = C2\backslash state / C2\backslash c;$
 $C3\backslash p.e = C3\backslash state / C3\backslash c;$
 $C4\backslash p.e = C4\backslash state / C4\backslash c;$
 $C5\backslash p.e = C5\backslash state / C5\backslash c;$
 $C6\backslash p.e = C6\backslash state / C6\backslash c;$
 $C7\backslash p.e = C7\backslash state / C7\backslash c;$
 $Cuerpo_DG\backslash tetha_2\backslash input = Cuerpo_DG\backslash J\backslash state / Cuerpo_DG\backslash J\backslash i;$
 $Cuerpo_DG\backslash xG\backslash input = Cuerpo_DG\backslash mx_DG\backslash state / Cuerpo_DG\backslash mx_DG\backslash i;$
 $Cuerpo_DG\backslash yG\backslash input = Cuerpo_DG\backslash my_DG\backslash state / Cuerpo_DG\backslash my_DG\backslash i;$
 $Cuerpo_PS\backslash tetha_5\backslash input = Cuerpo_PS\backslash J\backslash state / Cuerpo_PS\backslash J\backslash i;$
 $Cuerpo_PS\backslash xG\backslash input = Cuerpo_PS\backslash mSP3\backslash state / Cuerpo_PS\backslash mSP3\backslash i;$
 $Cuerpo_PS\backslash yG\backslash input = Cuerpo_PS\backslash mSPy\backslash state / Cuerpo_PS\backslash mSPy\backslash i;$


```

Cuerpo_SE\theta_5\input = Cuerpo_SE\J\state / Cuerpo_SE\J\i;
theta\input = Cuerpo_SE\mSE_x\state / Cuerpo_SE\mSE_x\i;
Cuerpo_SE\mSE_y\p.f = Cuerpo_SE\mSE_y\state / Cuerpo_SE\mSE_y\i;
Cuerpo_DG\DGcos\p2.f = (Cuerpo_DG\DGcos\DG * cos (Cuerpo_DG\theta_2\output4)) * Cuerpo_DG\theta_2\input;
Cuerpo_DG\theta_2\output2_dot = Cuerpo_DG\theta_2\input;
Cuerpo_DG\theta_2\output3_dot = Cuerpo_DG\theta_2\input;
Cuerpo_DG\theta_2\output4_dot = Cuerpo_DG\theta_2\input;
Cuerpo_PS\PG2sin\p2.f = (Cuerpo_PS\PG2sin\PG * sin (Cuerpo_PS\theta_5\output1)) * Cuerpo_PS\theta_5\input;
Cuerpo_PS\PGcos\p2.f = (Cuerpo_PS\PGcos\PG * cos (Cuerpo_PS\theta_5\output4)) * Cuerpo_PS\theta_5\input;
Cuerpo_PS\SG2cos\p2.f = (Cuerpo_PS\SG2cos\SG * cos (Cuerpo_PS\theta_5\output3)) * Cuerpo_PS\theta_5\input;
Cuerpo_PS\SG2sin\p2.f = (Cuerpo_PS\SG2sin\SG * sin (Cuerpo_PS\theta_5\output2)) * Cuerpo_PS\theta_5\input;
Cuerpo_PS\theta_5\output2_dot = Cuerpo_PS\theta_5\input;
Cuerpo_PS\theta_5\output3_dot = Cuerpo_PS\theta_5\input;
Cuerpo_PS\theta_5\output4_dot = Cuerpo_PS\theta_5\input;
Cuerpo_SE\cos_th1\p2.f = (Cuerpo_SE\cos_th1\th * cos (Cuerpo_SE\theta_5\output)) * Cuerpo_SE\mSE_y\p.f;
Cuerpo_SE\sin_th\p2.f = (Cuerpo_SE\sin_th\th * sin (Cuerpo_SE\theta_5\output)) * theta\input;
Cuerpo_SE\_Esi\p2.f = Cuerpo_SE\_Esi\r * Cuerpo_SE\theta_5\input;
OneJunction16\p1.e = -C7\p.e;
vex\p1.e = -C4\p.e;
vey\p1.e = -C5\p.e;
Cuerpo_DG\DGsin\p2.f = (Cuerpo_DG\DGsin\DE * sin (Cuerpo_DG\theta_2\output1)) * Cuerpo_DG\theta_2\input;
Cuerpo_DG\EGcos\p2.f = (Cuerpo_DG\EGcos\EG * cos (Cuerpo_DG\theta_2\output3)) * Cuerpo_DG\theta_2\input;
Cuerpo_DG\EGsin\p2.f = (Cuerpo_DG\EGsin\EG * sin (Cuerpo_DG\theta_2\output2)) * Cuerpo_DG\theta_2\input;

```

```

C1\p.f = Cuerpo_DG\DGcos\p2.f + Cuerpo_DG\yg\input;
Cuerpo_PS\ZeroJunction\p3.f = Cuerpo_PS\SG2sin\p2.f + Cuerpo_PS\xG\input;
C2\p.f = Cuerpo_PS\PG2sin\p2.f + Cuerpo_PS\xG\input;
Cuerpo_PS\ZeroJunction2\p3.f = Cuerpo_PS\SG2cos\p2.f + Cuerpo_PS\yg\input;
C3\p.f = Cuerpo_PS\PGcos\p2.f + Cuerpo_PS\yg\input;
Cuerpo_SE\cos_th1\p1.e = (Cuerpo_SE\cos_th1\th * cos (Cuerpo_SE\theta_5\output)) * Cuerpo_SE\OneJunction\p2.e;
Cuerpo_SE\MultiplyDivide1\output = (Cuerpo_SE\mSE_x\state .* Cuerpo_SE\theta_5\input) ./ 1.0;
Cuerpo_SE\ZeroJunction3\p3.f = Cuerpo_SE\_Esi\p2.f + Cuerpo_SE\mSE_y\p.f;
Cuerpo_SE\ZeroJunction4\p3.f = Cuerpo_SE\cos_th1\p2.f + Cuerpo_SE\sin_th\p2.f;
Cuerpo_SE\_Psi\p2.f = Cuerpo_SE\_Psi\r * Cuerpo_SE\theta_5\input;
deslizamiento_x\p2.f = Delizamientox\output * Cuerpo_PS\tetha_5\input;
C6\p.f = Cuerpo_PS\tetha_5\input + Cuerpo_SE\theta_5\input;
_theta\input = theta\input;
Cuerpo_DG\ZeroJunction\p3.f = Cuerpo_DG\EGsin\p2.f + Cuerpo_DG\xG\input;
C\p.f = Cuerpo_DG\DGsin\p2.f + Cuerpo_DG\xG\input;
Cuerpo_DG\ZeroJunction2\p3.f = Cuerpo_DG\EGcos\p2.f + Cuerpo_DG\yg\input;
Cuerpo_SE\mw\p1.e = Cuerpo_SE\MultiplyDivide1\output * theta\input;
Cuerpo_SE\mw\p2.e = Cuerpo_SE\MultiplyDivide1\output * Cuerpo_SE\mSE_y\p.f;
Cuerpo_SE\sin_th\p1.e = (Cuerpo_SE\sin_th\th * sin (Cuerpo_SE\theta_5\output)) * Cuerpo_SE\OneJunction\p2.e;
Cuerpo_SE\ZeroJunction2\p3.f = Cuerpo_SE\_Psi\p2.f + Cuerpo_SE\mSE_y\p.f;
deslizamiento_x\p1.e = Delizamientox\output * OneJunction16\p1.e;
theta\output2_dot = theta\input;
_cos\p1.e = cos (_theta\output2) * C4\p.e;

```

```

_cosp2.f = cos (_theta\output2) * theta\input;
_coss\p1.e = cos (_theta\output1) * C5\p.e;
_coss\p2.f = cos (_theta\output1) * theta\input;
_sen\p2.f = sin (theta\output2) * theta\input;
_sin\p2.f = sin (theta\output1) * theta\input;
_theta\output2_dot = _theta\input;
Cuerpo_DG\DGcos\p1.e = (Cuerpo_DG\DGcos\DG * cos (Cuerpo_DG\tetha_2\output4)) * C1\p.e;
Cuerpo_DG\DGsin\p1.e = (Cuerpo_DG\DGsin\DE * sin (Cuerpo_DG\tetha_2\output1)) * C\p.e;
Cuerpo_PS\PG2sin\p1.e = (Cuerpo_PS\PG2sin\PG * sin (Cuerpo_PS\tetha_5\output1)) * C2\p.e;
Cuerpo_PS\PGcos\p1.e = (Cuerpo_PS\PGcos\PG * cos (Cuerpo_PS\tetha_5\output4)) * C3\p.e;
Cuerpo_SE\_Esi\p1.e = Cuerpo_SE\_Esi\r * C7\p.e;
ve2_y\p2.e = _cosp1.e + _coss\p1.e;
w\p1.e = C6\p.e + deslizamiento_x\p1.e;
ZeroJunction2\p3.f = _cosp2.f + _sin\p2.f;
ZeroJunction3\p3.f = _coss\p2.f + _sen\p2.f;
_sen\p1.e = sin (theta\output2) * C5\p.e;
_sin\p1.e = sin (theta\output1) * C4\p.e;
Cuerpo_DG\EGcos\p1.e = (Cuerpo_DG\EGcos\EG * cos (Cuerpo_DG\tetha_2\output3)) * vey\p1.e;
Cuerpo_DG\EGsin\p1.e = (Cuerpo_DG\EGsin\EG * sin (Cuerpo_DG\tetha_2\output2)) * vex\p1.e;
t\p2.f = deslizamiento_x\p2.f + Cuerpo_PS\ZeroJunction\p3.f;
ve2_x\p1.e = _sin\p1.e + _sen\p1.e;
Delizamientox\input = Cuerpo_SE\ZeroJunction2\p3.f - Cuerpo_PS\ZeroJunction2\p3.f;
Cuerpo_DG\mx_DG\p.e = -(vex\p1.e + C\p.e);

```

```

Cuerpo_DG\my_DG\p.e = Cuerpo_DG\grav\p.e - (C1\p.e + vey\p1.e);
Cuerpo_DG\J\p.e = -(((Cuerpo_DG\DGsin\p1.e + Cuerpo_DG\EGcos\p1.e) + Cuerpo_DG\EGsin\p1.e) + Cuerpo_DG\DGcos\p1.e);
Cuerpo_PS\SG2cos\p1.e = (Cuerpo_PS\SG2cos\SG * cos (Cuerpo_PS\tetha_5\output3)) * Ft\p.e;
Cuerpo_SE\J\p.e = -(Cuerpo_SE\Psi\p1.e + (Cuerpo_SE\Esi\p1.e + C6\p.e));
Cuerpo_SE\mSE_y\p.e = -(((Cuerpo_SE\cos_th1\p1.e + C7\p.e) + Vs_x\p1.e) + Cuerpo_SE\mw\p1.e);
C4\p.f = ZeroJunction2\p3.f - Cuerpo_DG\ZeroJunction\p3.f;
C5\p.f = ZeroJunction3\p3.f - Cuerpo_DG\ZeroJunction2\p3.f;
Cuerpo_PS\SG2sin\p1.e = (Cuerpo_PS\SG2sin\SG * sin (Cuerpo_PS\tetha_5\output2)) * OneJunction16\p1.e;
Cuerpo_PS\mSPy\p.e = Cuerpo_PS\Se\p.e - (C3\p.e + Ft\p.e);
C7\p.f = Cuerpo_SE\ZeroJunction3\p3.f - t\p2.f;
Cuerpo_PS\mSP3\p.e = -(OneJunction16\p1.e + C2\p.e);
Cuerpo_PS\J\p.e = -(((Cuerpo_PS\PG2sin\p1.e + Cuerpo_PS\PGcos\p1.e) + Cuerpo_PS\SG2cos\p1.e) + Cuerpo_PS\SG2sin\p1.e) + w\p1.e);
Cuerpo_SE\mSE_x\p.e = Cuerpo_SE\mw\p2.e - ((ve2_y\p2.e + ve2_x\p1.e) + Cuerpo_SE\sin_th\p1.e);

```

Sistema de ecuaciones

```

C\state = int (C\p.f, C\state_initial);
C1\state = int (C1\p.f, C1\state_initial);
C2\state = int (C2\p.f, C2\state_initial);
C3\state = int (C3\p.f, C3\state_initial);
C4\state = int (C4\p.f, C4\state_initial);
C5\state = int (C5\p.f, C5\state_initial);
C6\state = int (C6\p.f, C6\state_initial);
C7\state = int (C7\p.f, C7\state_initial);
Cuerpo_DG\J\state = int (Cuerpo_DG\J\p.e, Cuerpo_DG\J\state_initial);

```

```

Cuerpo_DG\mx_DG\state = int (Cuerpo_DG\mx_DG\p.e, Cuerpo_DG\mx_DG\state_initial);
Cuerpo_DG\my_DG\state = int (Cuerpo_DG\my_DG\p.e, Cuerpo_DG\my_DG\state_initial);
Cuerpo_DG\tetha_2\output1 = int (Cuerpo_DG\tetha_2\input, Cuerpo_DG\tetha_2\initial);
Cuerpo_DG\tetha_2\output2 = int (Cuerpo_DG\tetha_2\output2_dot, Cuerpo_DG\tetha_2\output2_initial);
Cuerpo_DG\tetha_2\output3 = int (Cuerpo_DG\tetha_2\output3_dot, Cuerpo_DG\tetha_2\output3_initial);
Cuerpo_DG\tetha_2\output4 = int (Cuerpo_DG\tetha_2\output4_dot, Cuerpo_DG\tetha_2\output4_initial);
Cuerpo_DG\xG\output = int (Cuerpo_DG\xG\input, Cuerpo_DG\xG\initial);
Cuerpo_DG\yG\output = int (Cuerpo_DG\yG\input, Cuerpo_DG\yG\initial);
Cuerpo_PS\J\state = int (Cuerpo_PS\J\p.e, Cuerpo_PS\J\state_initial);
Cuerpo_PS\mSP3\state = int (Cuerpo_PS\mSP3\p.e, Cuerpo_PS\mSP3\state_initial);
Cuerpo_PS\mSPy\state = int (Cuerpo_PS\mSPy\p.e, Cuerpo_PS\mSPy\state_initial);
Cuerpo_PS\tetha_5\output1 = int (Cuerpo_PS\tetha_5\input, Cuerpo_PS\tetha_5\initial);
Cuerpo_PS\tetha_5\output2 = int (Cuerpo_PS\tetha_5\output2_dot, Cuerpo_PS\tetha_5\output2_initial);
Cuerpo_PS\tetha_5\output3 = int (Cuerpo_PS\tetha_5\output3_dot, Cuerpo_PS\tetha_5\output3_initial);
Cuerpo_PS\tetha_5\output4 = int (Cuerpo_PS\tetha_5\output4_dot, Cuerpo_PS\tetha_5\output4_initial);
Cuerpo_PS\xG\output = int (Cuerpo_PS\xG\input, Cuerpo_PS\xG\initial);
Cuerpo_PS\yG\output = int (Cuerpo_PS\yG\input, Cuerpo_PS\yG\initial);
Cuerpo_SE\J\state = int (Cuerpo_SE\J\p.e, Cuerpo_SE\J\state_initial);
Cuerpo_SE\mSE_x\state = int (Cuerpo_SE\mSE_x\p.e, Cuerpo_SE\mSE_x\state_initial);
Cuerpo_SE\mSE_y\state = int (Cuerpo_SE\mSE_y\p.e, Cuerpo_SE\mSE_y\state_initial);
Cuerpo_SE\theta_5\output = int (Cuerpo_SE\theta_5\input, Cuerpo_SE\theta_5\initial);
Delizamientox\output = int (Delizamientox\input, Delizamientox\initial);
theta\output1 = int (theta\input, theta\initial);

```

```
theta\output2 = int (theta\output2_dot, theta\output2_initial);  
_theta\output1 = int (_theta\input, _theta\initial);  
_theta\output2 = int (_theta\output2_dot, _theta\output2_init
```

Los submodelos de cada cuerpo son los siguientes:

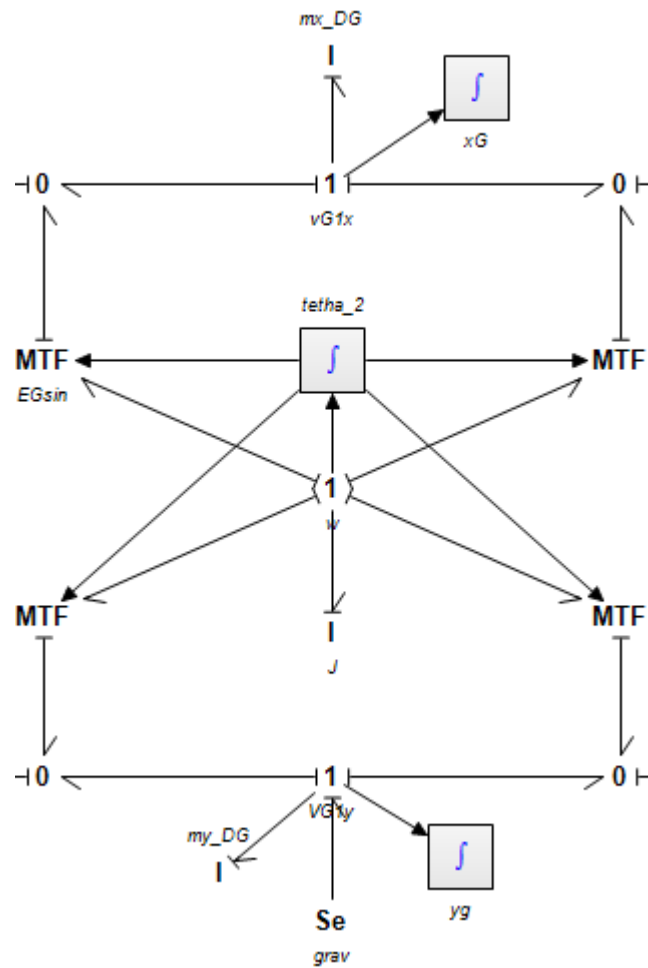


Figura 3-4. Bond Graph general de la velocidad angular.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

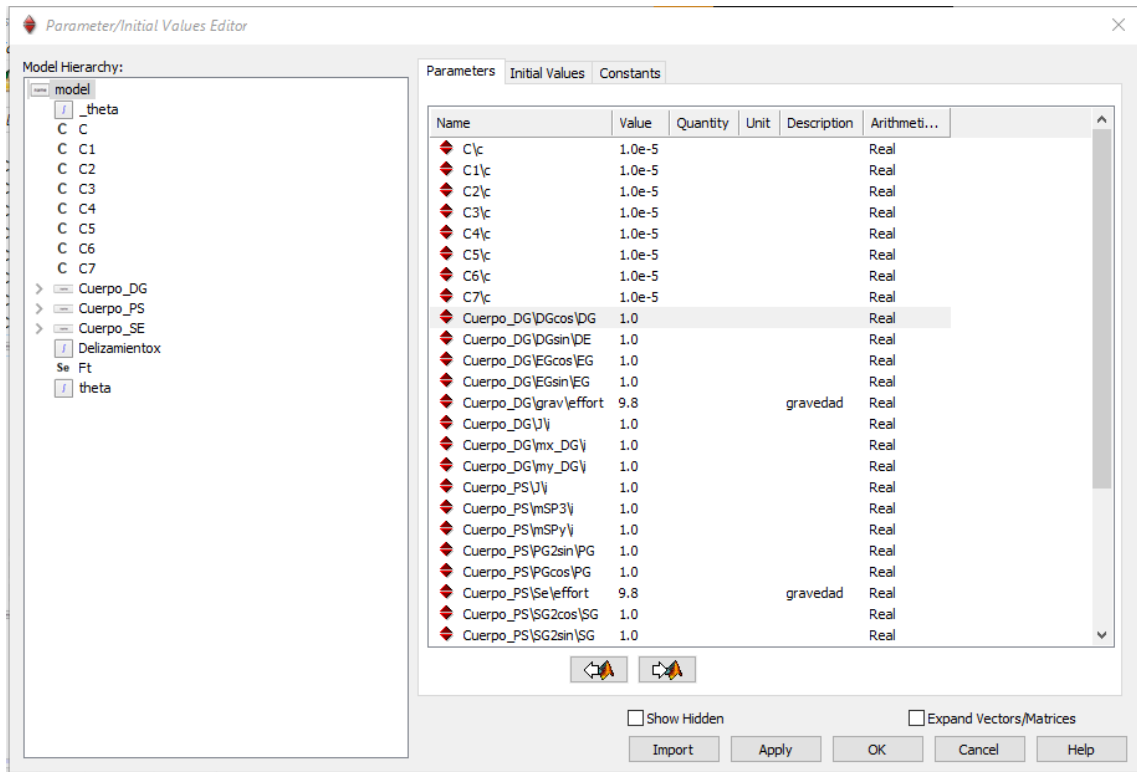


Figura 4-4. Ingreso de parámetros para la velocidad angular

Realizado por: Camacho Michelle 2022

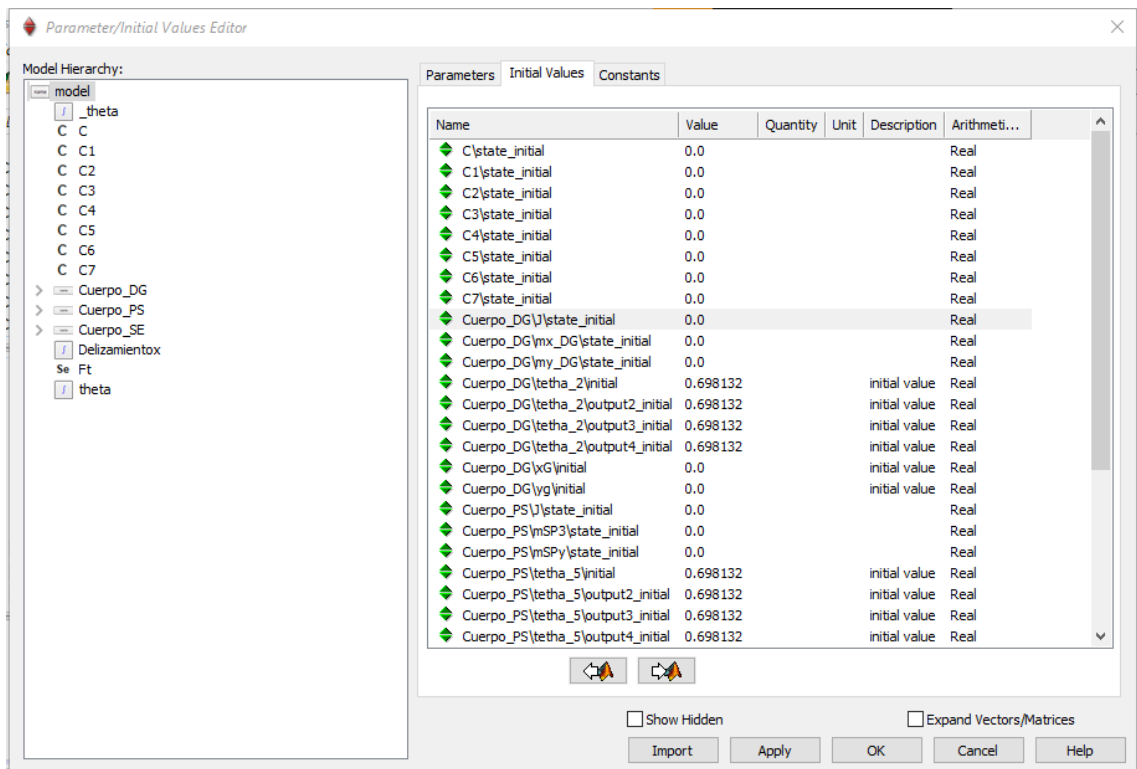


Figura 5-4. Valores iniciales para Bond Graph de silla de ruedas bipedestadora.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

4.1.1. Subsistema cuerpo DG

Analizando el cuerpo DG del sistema en el que se encuentran relacionadas las velocidades V_{Ex} , V_{Ey} , V_{Dx} , V_{Dy} que representan a los puertos de salida conectados al subsistema encontrado en el cuerpo, relaciona así la masa, inercia, gravedad del cuerpo DG.

Tabla 1-4: Datos del cuerpo DG

Masa (kg)	0.57832
Longitud(mm)	555
Inercia (kg*mm²)	2.94e ⁶

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Este puerto se ve enlazado con el esfuerzo y flujo existente en el elemento, originando que la salida de flujo sea la velocidad, posición y aceleración.

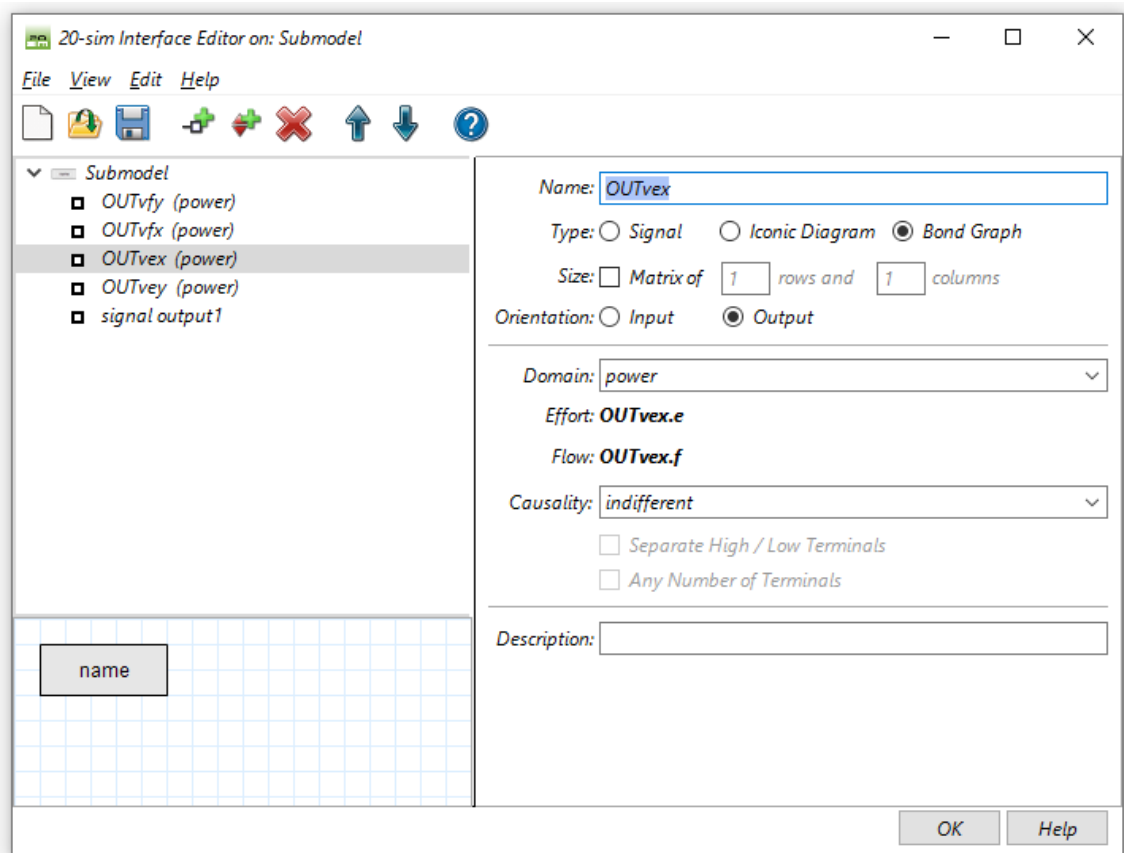


Figura 6-4. Configuración puertos de salida cuerpo DG.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

También se genera un puerto output que indica el tipo de señal del elemento.

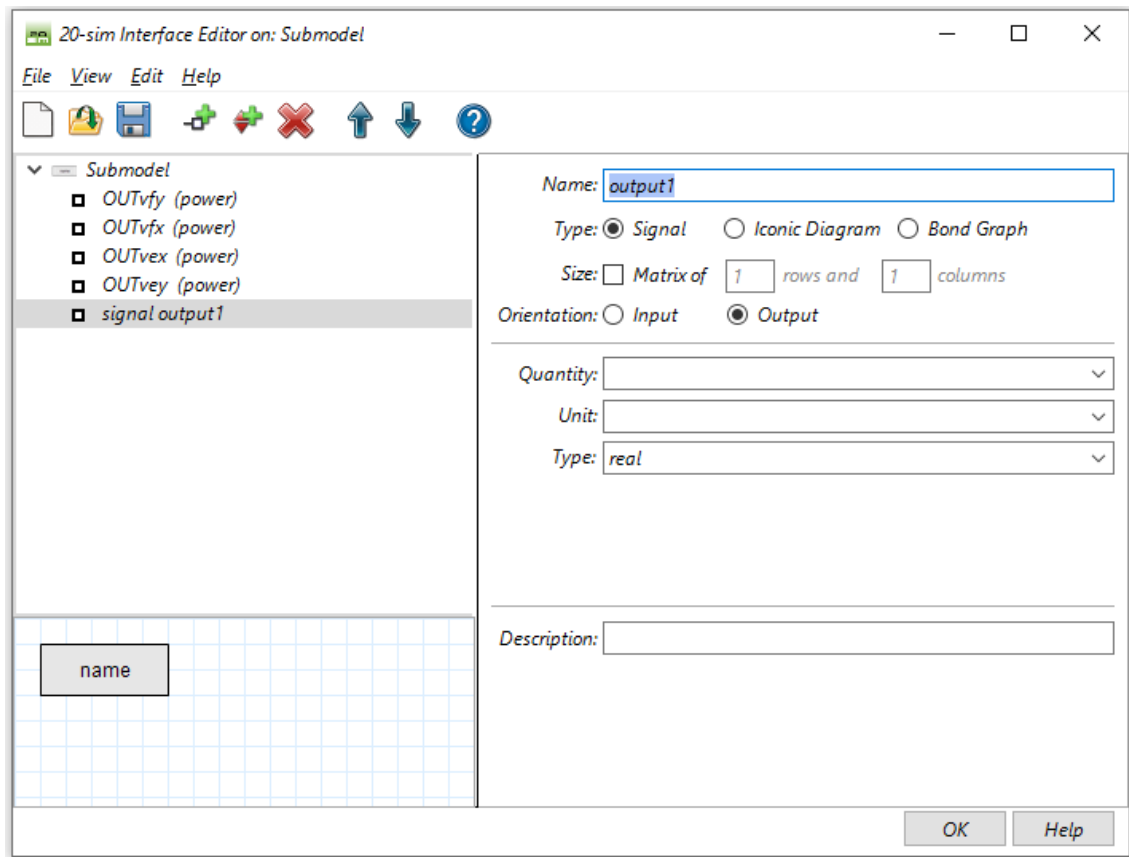


Figura 7-4. Configuración puertos de señal cuerpo DG.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Observamos que el momento de configurar el puerto de salida que representan las velocidades en los pasadores, estos tendrán una señal directa que permitirá que se conecten al modulador junction, los valores de MTF representan las funciones cartesianas que varían de acuerdo a la integración del análisis dinámico.

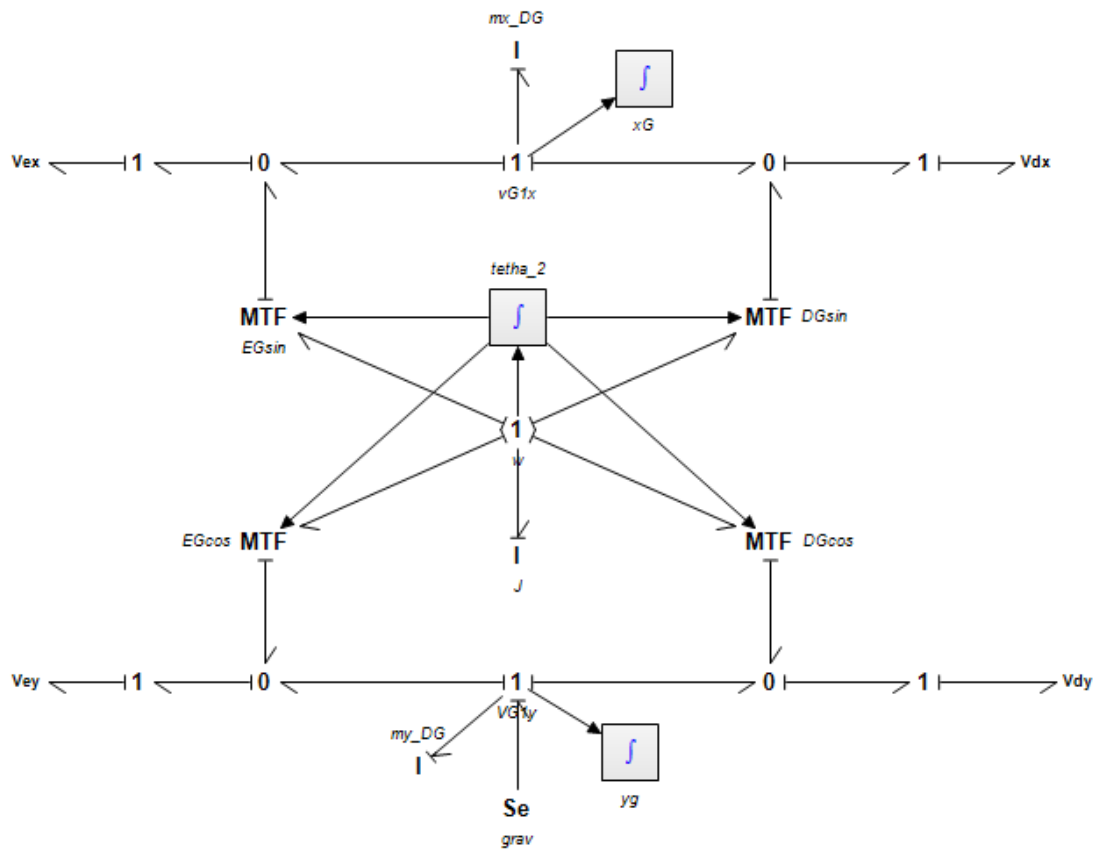


Figura 8-4. Subsistema del cuerpo DG.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

4.1.2. Subsistema cuerpo SE

Al igual que el cuerpo DG, se realizó un subsistema tomando en cuenta que este punto nos analizara velocidades angulares y lineales tales como V_{E2x} , V_{E5y} , V_{S2x} , V_{S2y} , w_2 , w_5 que representan a los puertos de salida conectados en el modelo .

Relacionados con el esfuerzo y flujo existente en el elemento.

Tabla 2-4: Datos del cuerpo SE.

Masa (kg)	0.36297
Longitud S(mm)	474.5
Inercia (kg*mm²)	1.64e ⁶

Realizado por: Camacho Michelle 2022

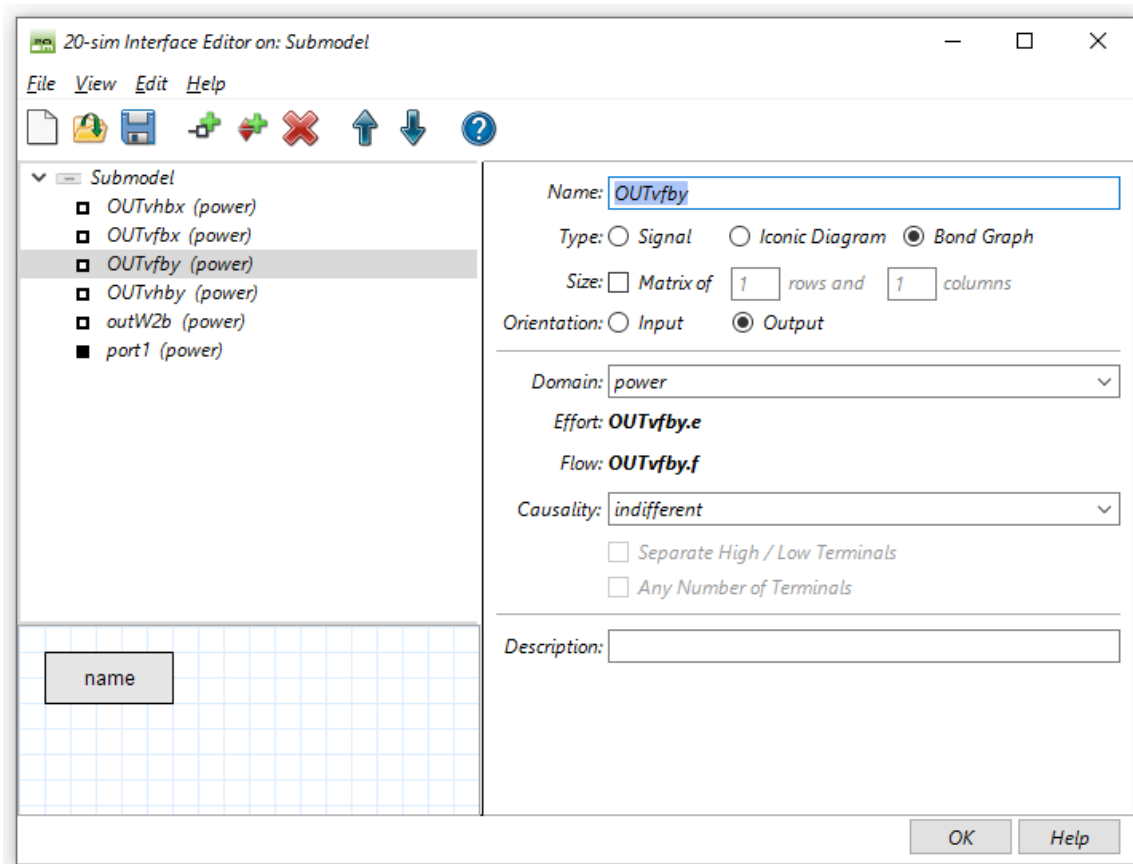


Figura 9-4. Configuración puertos de señal del cuerpo SE.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Observamos que el momento de configurar el puerto de salida que representan las velocidades tanto lineal como angular en los pasadores, estos tendrán una señal directa que permitirá que se conecten al elemento junction, los valores de MTF representan las funciones cartesianas que varían de acuerdo a la integración del análisis dinámico.

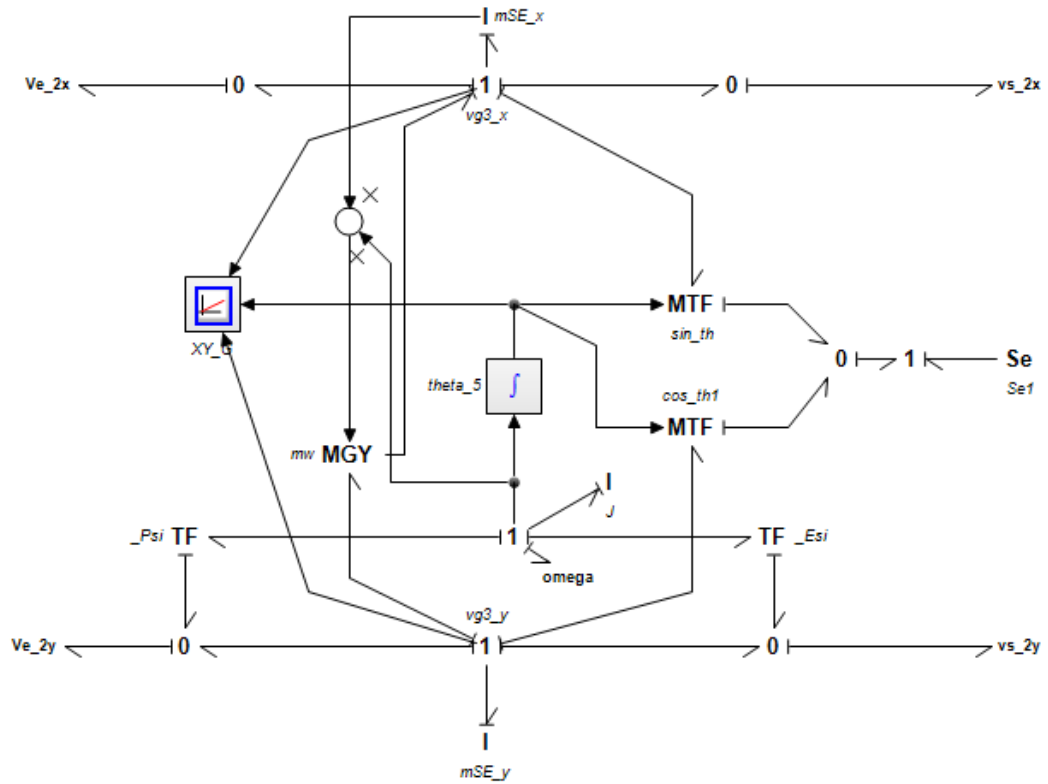


Figura 10-4. Subsistema del cuerpo SE.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

4.2. Subsistema Cuerpo PS

El cuerpo PS del sistema representado por las velocidades V_{Sx} , V_{Sy} , V_{Px} , V_{Py} , w_5 conectados a los puertos de salida del subsistema del cuerpo.

Este puerto se ve relacionado con el esfuerzo y flujo existente en el elemento.

Tabla 3-4: Datos del cuerpo PS.

Masa (kg)	0.25068
Longitud (mm)	170
Inercia (kg*mm²)	9.59e ⁵

Realizado por: Camacho Michelle 2022

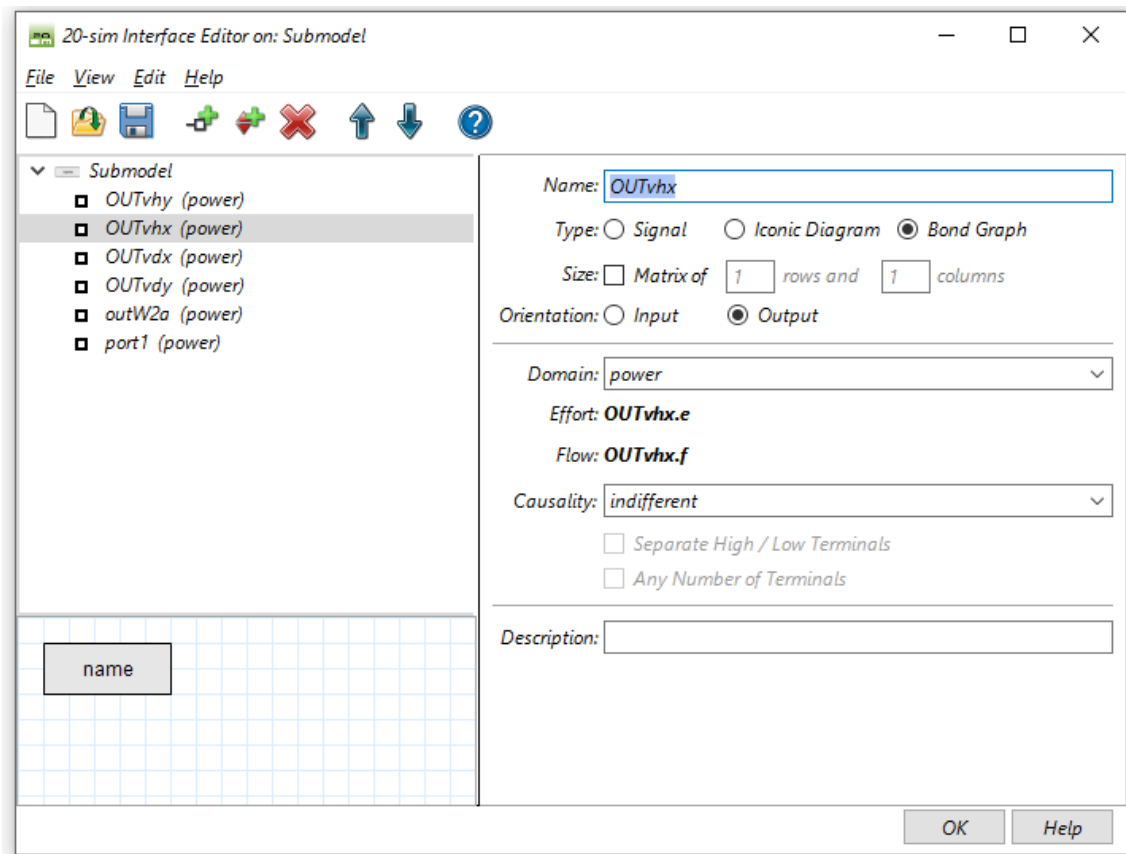


Figura 11-4. Configuración puertos de señal del cuerpo PS.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Observamos que el momento de configurar el puerto de salida que representan las velocidades tanto lineal como angular en los pasadores, estos tendrán una señal directa que permitirá que se conecten a el elemento junction , los valores de MTF representan las funciones cartesianas que varían de acuerdo a la integración del análisis dinámico

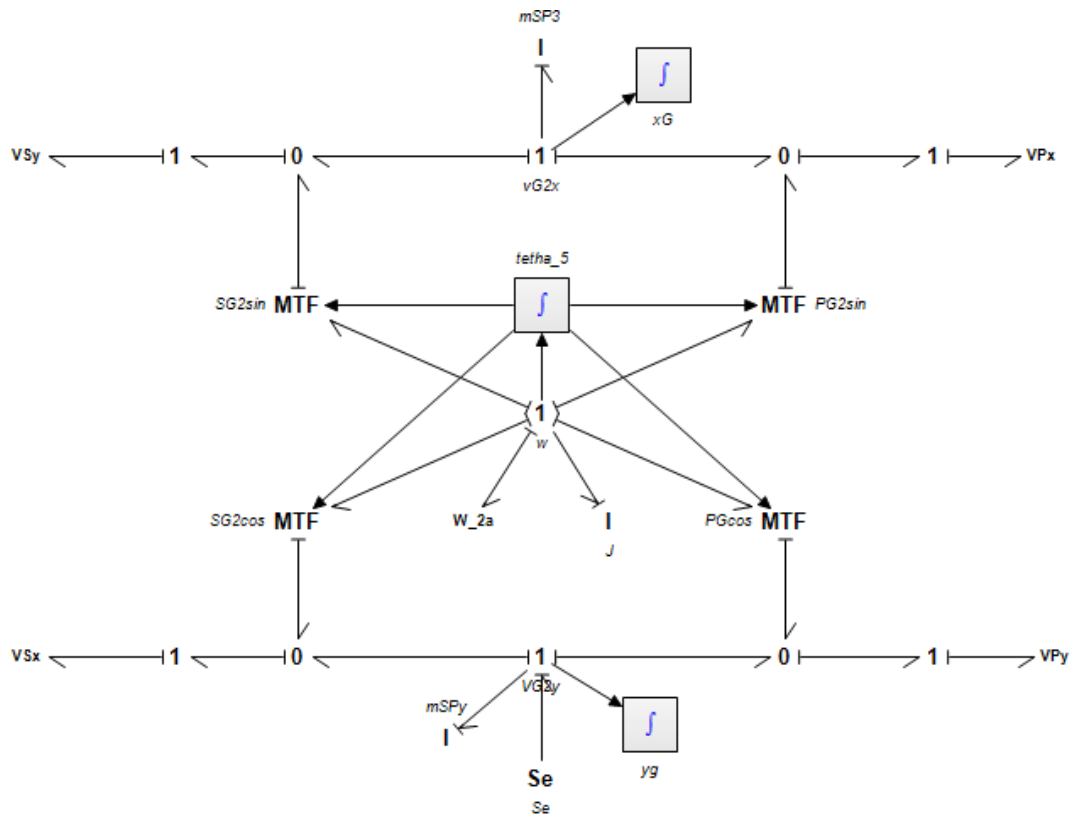


Figura 12-4. Subsistema del cuerpo PS.

Realizado por: Camacho Michelle 2022

4.2.2. Análisis Dinámico

4.1.2.1. Posiciones

A partir de la simulación en 20 -Sim se puede realizar una correlación con las gráficas de Bond Graph, basándonos en un análisis dinámico. Se obtienen las gráficas de posición y el desplazamiento que desarrolla la silla bipedestadora en su funcionamiento, sabiendo que el valor alcanzando de 1.15 metros de altura es un valor propuesto y es el máximo. Es así que el funcionamiento del mecanismo de 4 barras en su condición establecida ha permitido observar curvas generadas con una verticalidad en todo momento de su funcionamiento asegurando el cambio de posición del usuario de sedeste a bípedo (movimiento) .

Tabla 3-4: Resultados del modelo.

Longitud (mm)	1150
Carrera (mm)	220
Velocidad angular (grados /segundos)	8.47
Velocidad lineal (mm/seg)	82.08

Realizado por: Camacho Michelle 2022

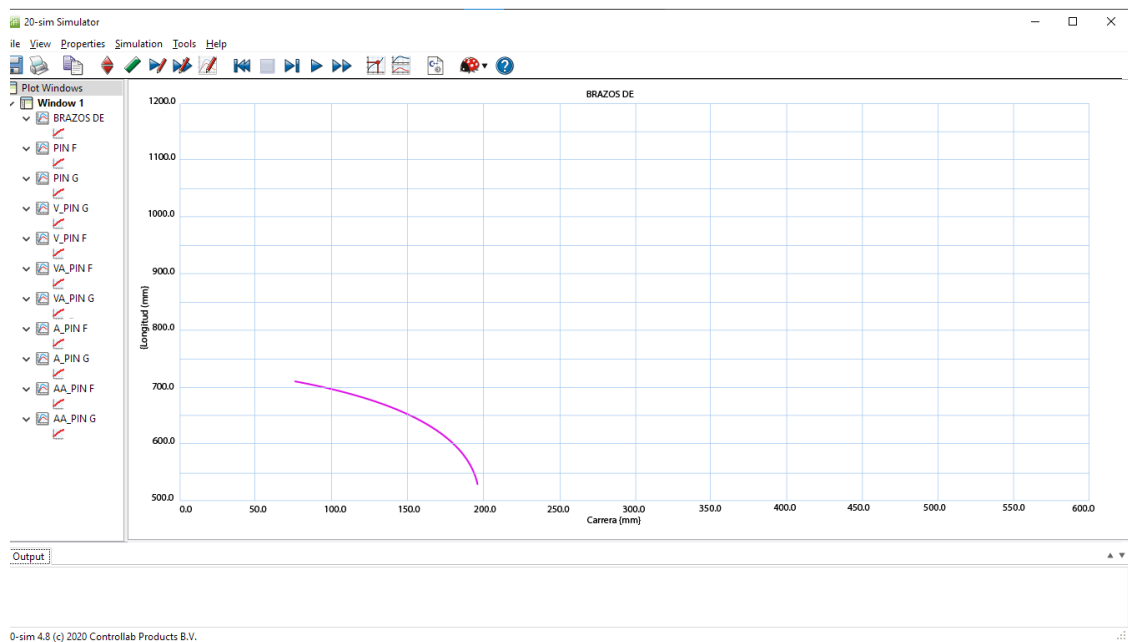


Gráfico 1-4. Variación de posición brazo DE vs tiempo 20-Sim

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Analizando la gráfica de posición vs carrera del brazo DE tenemos que a una longitud de 705 mm la carrera será de 80 mm, y al tener una carrera de 535 mm tenemos una carrera de 196 mm, provocando que este se desplace sin interferencia.

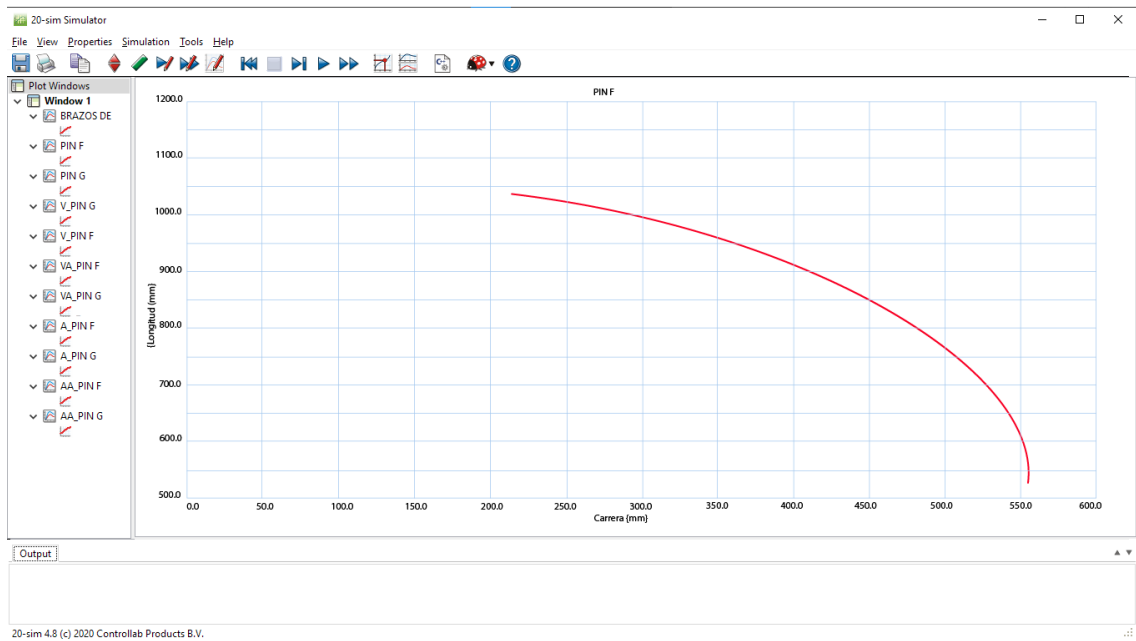


Gráfico 2-4. Variación de posición pin F vs tiempo 20-Sim

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Con respecto al pin F se observa que el movimiento es parecido al Brazo DE sin interferencia.

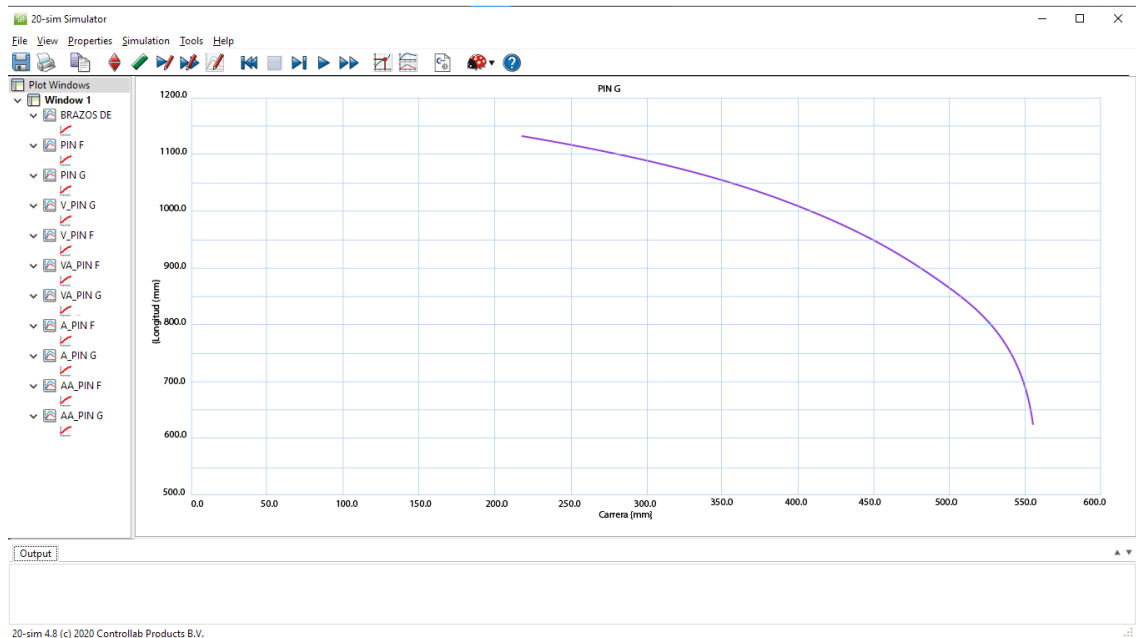


Gráfico 3-4. Variación de posición pin G vs tiempo 20-Sim

Realizado por: Camacho Michelle 2022

El pin G se relaciona con la altura máxima de la silla de ruedas bipedestadora, por lo que se observa que a una altura 1150 mm la carrera del elemento P será de 220mm.

4.1.2.2. Velocidades

La configuración cinemática de este mecanismo de cuatro barras se ve detallada en los lazos de control de forma simétrica, mediante la simulación del prototipo se observa su comportamiento simétrico (curvas de los pines G y F) al tener las mismas curvas de velocidades lineales y angulares con su punto más alto de 140 mm/s y el lazo de control analizado es correcto, como lo analizado mediante el modelo matemático.

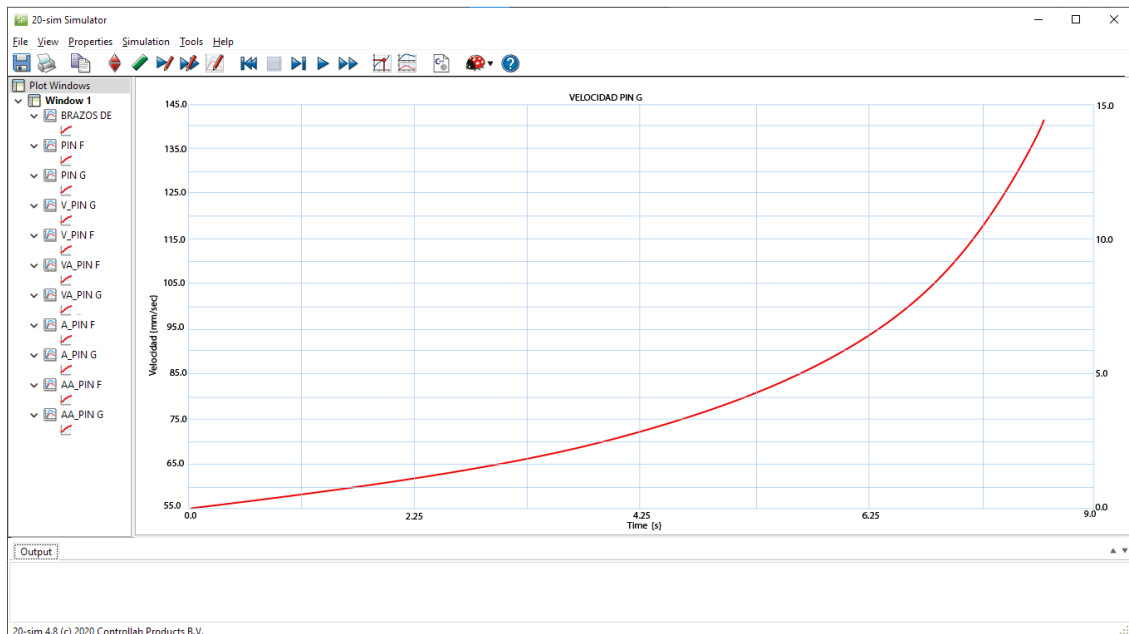


Gráfico 4-4. Variación de velocidad pin G vs tiempo 20-Sim

Realizado por: Camacho Michelle 2022

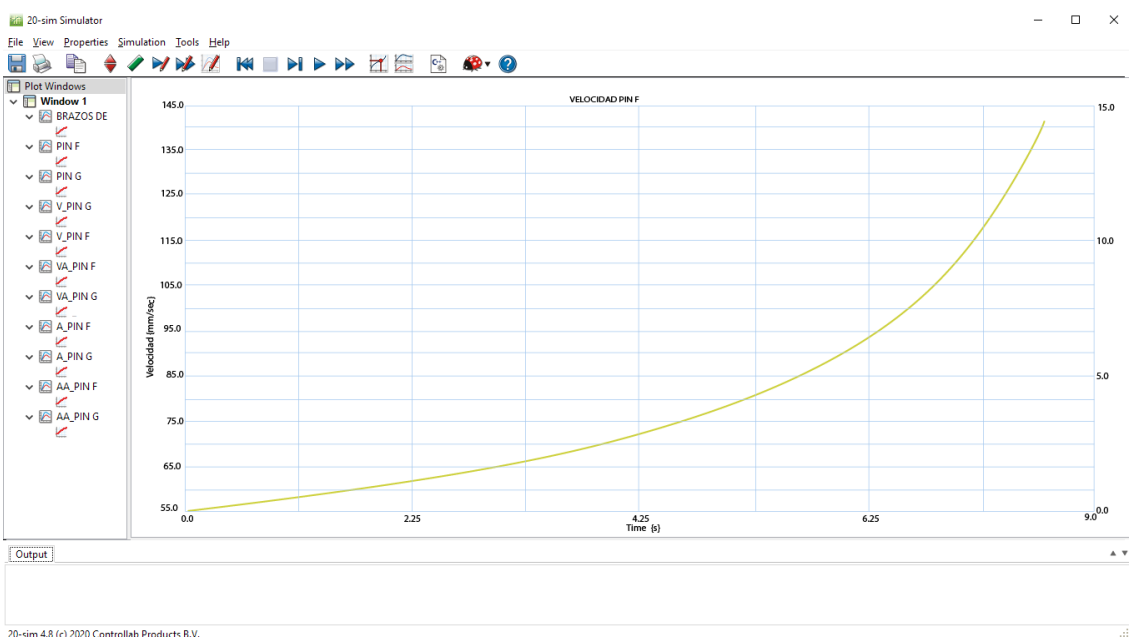


Gráfico 5-4. Variación de velocidad pin F vs tiempo 20-Sim

Realizado por: Camacho Michelle 2022

Observamos a detalle la velocidad relativa que se genera da en el cuerpo PS correspondiente al eslabón BG de anclaje como se detalló lo encontrado en el modelo matemático, esta velocidad tiene un valor de cero como lo propuesto en el modelo matemático.

4.1.2.3. Aceleraciones

En el caso de las aceleraciones refutamos que el comportamiento de las curvas de los pines C y F del mecanismo es simétrico, así como su aceleración máxima es de 70 mm/s² los mismos valores generados por el código al simplificar en un solo lazo de control. De igual manera la aceleración del cuerpo PS es de cero.

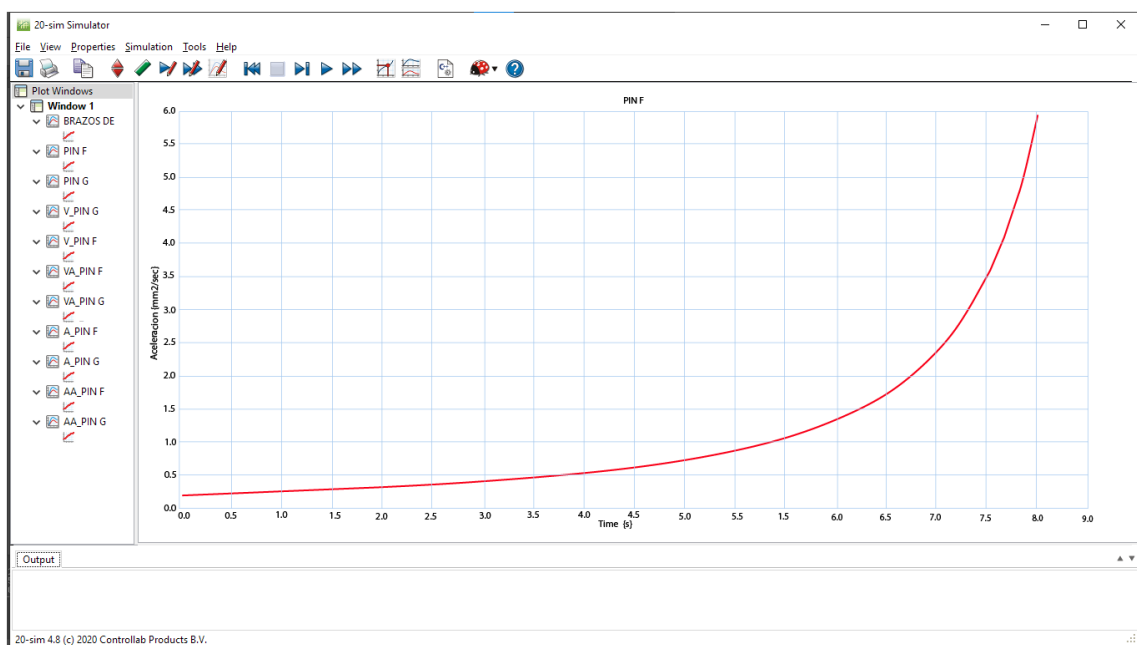


Gráfico 6-4. Variación de aceleración pin F vs tiempo 20-Sim

Realizado por: Camacho Michelle 2022

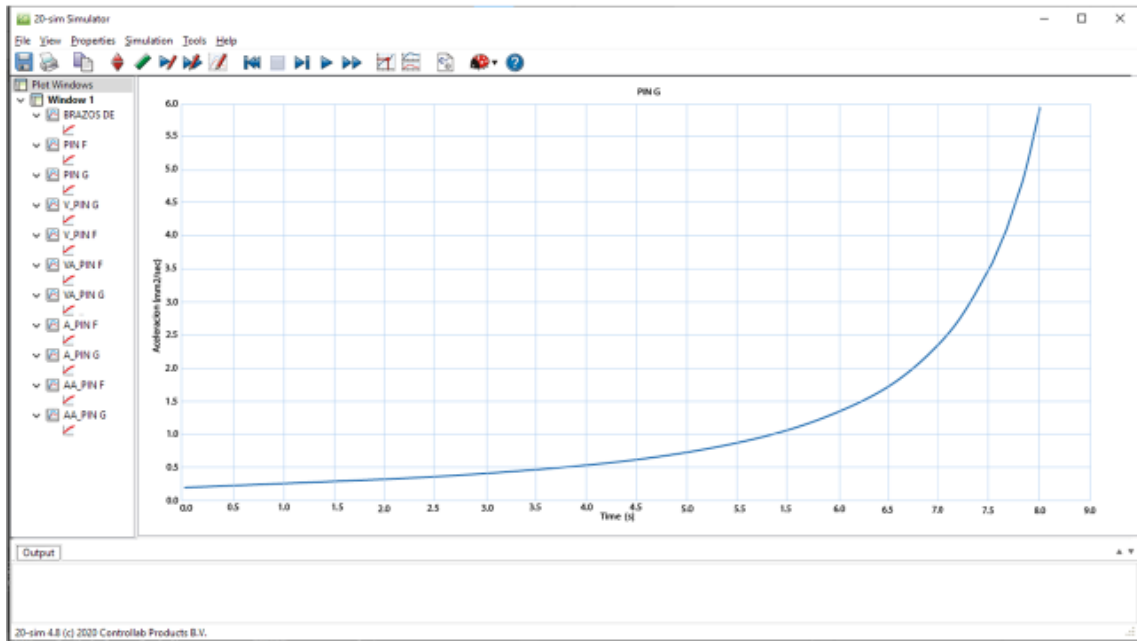


Gráfico 7-4. Variación de aceleración pin G vs tiempo 20-Sim

Realizado por: Camacho Michelle 2022

CONCLUSIONES

- El método de Bond Graph aplicado al mecanismo de la silla de ruedas bipedestadora es una representación gráfica de los componentes de almacenamiento, disipación e intercambio de energía, este modelo relaciona los cuerpos DG,PS y SE , en el que se encuentra elementos para la transformación de coordenadas que enlaza el movimiento rotacional y traslacional de los cuerpos DG y SE , además se presenta una velocidad relativa entre PS y SE simbolizada con las cotas de entrada de flujo y los puntos de convergencia la cual al ser integrada por el elemento ,es el deslizamiento, encontrando la velocidad angular de los cuerpos PS y SE, los subsistemas relacionan masas , inercias y gravedad de DG,PS y SE como puertos de entrada y la $V_{Ex}, V_{Ey}, V_{Sx}, V_{Sy}, V_{Px}, V_{Py}, V_{Dx}, V_{Dy}$, como puertos de salida .
- Dentro del análisis se concluyó que el método de Bond Graph nos permite controlar valores de velocidad angular y aceleración variando parámetros tales como masas, inercias y ángulos, generando que el flujo y esfuerzo varíe del modelo general a los submodelos de cada cuerpo, esto permite que el movimiento traslacional y rotacional del cuerpo se relacione, ayudando a que las masas se muevan durante la simulación.
- La modelación matemática de la silla de ruedas bipedestadora usando el programa 20-Sim se basó en una interfaz gráfica que involucra comandos de integración ,moduladores de transformación , integradores y puntos de convergencia de flujo , además muestra las ecuaciones estáticas y dinámicas enlazadas a los puertos ,la simulación del modelo analizo que no existen interferencia con el movimiento de los cuerpos , lo cual nos dice que cuando la posición de DG sea de 1.15 metros la velocidad angular es de 8.473 grados /seg es decir una velocidad lineal de 82.08 mm/seg.
- Además, la validación de datos mediante el programa 20-Sim permitió una interpretación más clara de cómo la energía se disipa o transforma en el sistema para dar movimiento a las masas, aplicando cada uno de los parámetros existentes y un modelo gráfico con movimiento relacionado con las gráficas de posición, velocidad y aceleración del modelo.
- Las investigaciones futuras deberían explorar nuevos elementos gráficos que optimicen el uso de variables, además de otros que involucren el uso de fuerzas en el método de Bond Graph de la silla de ruedas bipedestadora es así que en un futuro rediseño este procedimiento puede ayudar a entender de una manera interactiva los deslizamientos y velocidades del cuerpo, además de variar algunos comandos que mejoraran el mecanismo.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda analizar las direcciones de los flujos y esfuerzos de salida en el método de Bond Graph ya que estos serán los valores de posición, velocidad y aceleración.
- Se recomienda analizar con mayor detenimiento y buscar otras alternativas que simplifiquen el modelo y submodelos propuestos gráficamente, es decir la utilización de otros elementos de flujo y esfuerzo que mejoren el sistema.
- Para seguir evaluando la utilización del método de Bond Graph en diseños y rediseños de este tipo, se recomienda el uso de un programa que tenga una interfaz gráfica, así como permita simular modelos dinámicos de una manera amplia como el programa 20 –SIM.
- Se recomienda para futuras investigaciones del método de Bond Graph el uso de elementos eléctricos o de automatización representados que permitan generar el movimiento de manera más fácil.

BIBLIOGRAFÍA

ANTONIO, B. *Obtención y Simplificación de Ecuaciones de Estado* [en línea]. Cali - Colombia: Universidad Santiago de Cali, 2000. [Consulta: 15 diciembre 2021]. Disponible en: <https://www.usc.edu.co/files/LABORATORIOS/GUIAS/INGENIERIA/INGENIERIA%20EN%20SISTEMAS/CIRCUITOS%20DIGITALES%20II/ECUACIONES%20DE%20ESTADO.pdf>

AVALOS GONZALES, Gilberto. *Técnicas de Control Basadas en el Dominio Físico para Sistemas LTI MIMO . Aplicación a la Máquina Síncrona* [en línea] (Trabajo de titulación). (Doctorado) Universidad Autónoma de Nuevo León, Mexico DF. 2004. pp. 10- 230. [Consulta: 10 diciembre 2021]. Disponible en: <https://cd.dgb.uanl.mx/handle/201504211/15999>

BAGHLI, F. & EL BAKKALI, L. " Bond Graph Modeling of a Robot Manipulator " . Congrès Français de Mécanique [en línea], 2015, (Morocco) , 22(1), pp. 3-9. [Consulta: 03 diciembre 2021]. Disponible en: <http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/57515/68782.pdf?sequence=1>

CAMARGO , E; et al. " Estudio de los rangos articulares en la bipedestación estática en personas normales vs. Amputados transtibiales". *Tecnura* [en línea], 2013, 17(2), pp. 60 - 68. [Consulta: 05 de enero 2021]. Disponible en: <http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/57515/68782.pdf?sequence=1>

CELLIER, F., *Modelado Orientado a Objetos de Sistemas Físicos*. [Consulta: 02 febrero 2022]. Disponible en: <http://venus.santafe-conicet.gov.ar/pipermail/notiamca/2007-December/000566.html>

CRAMPIN, J. & NIELSEN, N S. "Computer Methods and Programs in Biomedicine". *Physiology* [en línea], 2003, pp. 316 - 25. [Consulta: 05 de febrero 2021]. Disponible en: <https://journals.physiology.org/doi/pdf/10.1152/physiol.00022.2005>

HERRERA CAICEDO, Mario Andrés. *Diseño y simulación de una silla de ruedas bipedestadora para personas adultas con discapacidad física a nivel de paraplejia o con problemas de movilidad de uso en interiores* [en línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniero) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2020. pp. 10-115. [Consulta: 10 febrero 2022]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/15141/1/15T00778.pdf>

KLEIJN, C. & GROOTHUIS, L. . *Getting started 20-sim 4.6* [en línea]. USA: Controllab Products, 2016. [Consulta: 01 febrero 2022]. Disponible en: <https://www.20sim.com/downloads/files/20simGettingStarted46.pdf>

MATHEWS, J. *Numerical Methods for Mathematics, Science, and Engineering* [en línea]. Englewood Cliffs, 1992. [Consulta: 01 febrero 2022]. Disponible en: <https://is.muni.cz/publication/378095>

HARDY, J; et al. " Sistema de diagnóstico utilizando técnicas de bond graph en sistemas termo-hidráulicos". Amcaonline [en línea], 2016, (México) 34(1), pp.979 - 997. [Consulta: 05 de febrero 2021]. Disponible en: <file:///C:/Users/Erika%20Elizabeth/Downloads/5026-2227-1-PB.pdf>

MINISTERIO DE SALUD PUBLICA. Consejo nacional para la igualdad de discapacidades. [Consulta: 12 febrero 2022]. Disponible en: <https://www.consejodiscapacidades.gob.ec/>

MORILLO, S. "Implementación del sistema de control del prototipo bipedestador móvil". Universidad Técnica del Norte [en línea], 2014, (Ecuador). Consulta: [30 de enero 2022]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/7152/2/ART%C3%8DCULO.pdf>

MOTEN,S; et al. "Modeling and validation for modern complex mechatronic systems". ScienceDirect [en línea], 2014, (South Africa) 47(3), pp. 5605 - 5610. Consulta: [12 de enero 2022]. Disponible en: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1474667016424870?token=61A8144071CFEE319A8BD24DBBC103F5A5C9476C784C14E7D6539E02A35D2905A8766C93A0100E6A261D4B79F809F82C&originRegion=us-east-1&originCreation=20220406031350>

OBANDO HERRERA, Fabio Eduardo. Silla bipedestadora para personas con movilidad restringida grado IV en las extremidades inferiores con una capacidad de carga de 100kg [en línea] (trabajo de titulación). (Ingeniero). Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador 2017. pp. 10-70. Consulta: [18 de enero 2022]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/11394/3/UPS-KT01207.pdf>

OGATA, K.,. *Ingeniería de Control Moderno* [en línea]. Madrid . España: PEARSON EDUCACION S.A, 1998. Consulta: [18 de enero 2022]. Disponible en: https://www.academia.edu/9814191/Ingenieria_de_Control_Moderna_Ogata_5ed

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD,. Informe Mundial Sobre la Discapacidad. [Consulta: 24 febrero 2022]. Disponible en: <https://www.consejodiscapacidades.gob.ec/>

PAREDES TORRES, Erika Katherine & TOAPANTA QUIMBITA, Jessica Estefania. Diseño e implementación de un bipedestador automático para la movilidad de adultos mayores del hogar de vida “Luis Maldonado Tamayo” ubicado en el cantón Pujili [en línea] (trabajo de titulación). (Ingeniero) Universidad de las Fuerzas Armadas, Latacunga, Cotopaxi. 2018. pp. 20 - 135. Consulta: [17 de enero 2022]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/13995/T-ESPEL-EMI-0340.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ROMERO, G; et al. "Kinematic analysis of mechanism by using bond-graph language". ResearchGate [en línea], 2006, pp. 3-5. Consulta: [18 de enero 2022]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/228956630_Kinematic_Analysis_Of_Mechanism_By_Using_Bond-Graph_Language

ROMERO, G. "Procedimientos optimizados utilizando métodos simbólicos para la simulación de sistemas dinámicos mediante Bond-Graph". Dialnet [en línea], 2005. Consulta: [21 de enero

2022]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=2483>

SAAVEDRA, R; et al. "Diseño de un equipo de bipedestación". Revista Ingeniería UC [en línea], 2013, (Venezuela) 20(1), pp. 26-29. Consulta: [18 de enero 2022]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/707/70732640004.pdf>

SALA, Sergio., Estudio y análisis de formalismos gráficos EMR en sistemas electromecánicos [en línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniero) Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España. 2016. pp. 20-80. Consulta: [18 de enero 2022]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/26825>

SAMANTARAY, A. *Supervisión de procesos basada en modelos* [en línea]. Londres: Springer - Londres, 2008. Consulta: [18 de febrero 2022]. Disponible en: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-84800-159-6#about>

SONG, Z. & TIAN, C, "Mechanism design and analysis of a proposed wheelchair-exoskeleton hybrid robot for assisting human movement". Ciencias Mecánicas [en línea], 2019, (China) 10(1), pp. 12-14. Consulta: [01 de febrero 2022]. Disponible en: <https://ms.copernicus.org/articles/10/11/2019/>

TELEGRAFO, E., *Personas con discapacidad cuentan con más derecho* [en línea]. Consulta: [01 de febrero 2022]. Disponible en: <http://45.238.216.13/ojs/index.php/EPISTEME/article/view/1771/1023#:~:text=Las%20personas%20con%20discapacidad%20tienen,inherentes%20a%20todo%20ser%20humano.>

TERÁN, H; et al. "Design of an autonomous standing frame prototype for older adults with motorized disability". Journal of Physics: Conference Series [en línea], 2020, (USA) 1432(1), pp. 2-9. Consulta: [01 de febrero 2022]. Disponible en: <https://www.proquest.com/openview/b5cb912de2aef8b0ef101aed0a706ba6/1?pq-origsite=gscholar&cb1=4998668>

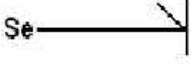

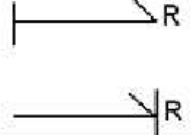
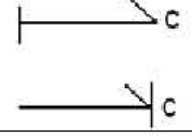
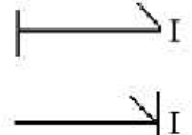
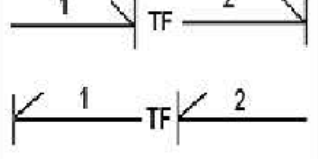
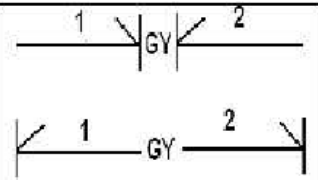
VERNAZA, M; et.al. "Prototipo de silla bipedestadora semi-automatica con tres posiciones de movimiento". Universidad, Ciencia y Tecnología [en línea], 2018, (Ecuador) 3(1), pp. 33-44. Consulta: [12 de febrero 2022]. Disponible en: <https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/85/86>

WIERESZEN, N. *Análisis de la Actividad Muscular en Posición Bípeda y Durante la Marcha* [en línea]. Consulta: [22 de febrero 2022]. Disponible en: <https://zdocs.mx/doc/marcha-y-bipedestacion-kj1jqnoemmpe>

YU, E; et al. "Evaluation of Postural Control in Quiet Standing Using Center of Mass Acceleration: Comparison Among the Young, the Elderly, and People With Stroke". National Library of Medicine [en línea], 2008, 89(6), pp. 9-100. Consulta: [10 de diciembre 2021]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18503811/>

ANEXOS

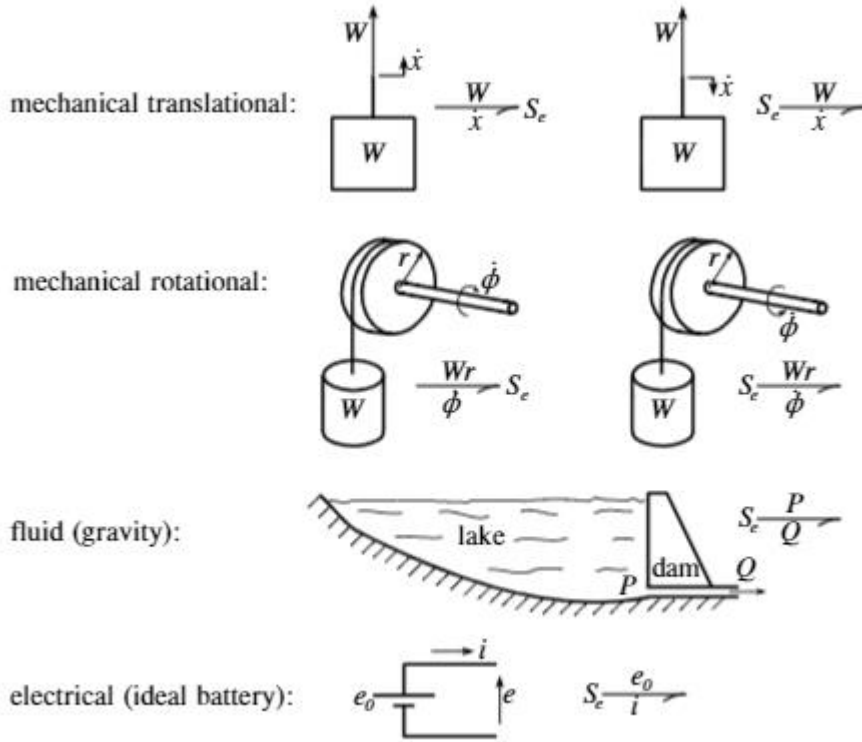
Anexo A Elementos de Bond Graph

ELEMENT	SYMBOL	CAUSALITY	EQUATION
SOURCE OF EFFORT	Se		
SOURCE OF FLOW	Sf		
RESISTIVE ELEMENT	R		$e(t) = R * f(t)$ $f(t) = R / e(t)$
COMPLIANCE ELEMENT	C		$e(t) = \frac{1}{C} \int f(t) dt$ $f(t) = C * \frac{d}{dt} e(t)$
INERTIAL ELEMENT	I		$e(t) = I * \frac{d}{dt} f(t)$ $f(t) = \frac{1}{I} \int e(t) dt$
TRANSFORMER	TF		$e_2(t) = \text{const} * e_1(t)$ $f_1(t) = \text{const} * f_2(t)$ $f_2(t) = \text{const} * f_1(t)$ $e_1(t) = \text{const} * e_2(t)$
GYRATOR	GY		$f_2(t) = \text{const} * e_1(t)$ $f_1(t) = \text{const} * e_2(t)$ $e_2(t) = \text{const} * f_1(t)$ $e_1(t) = \text{const} * f_2(t)$

Symbol	Element type	Element name	Symbol (preferred causality)	Causal Relation (preferred causality)
Se	Source	Effort source (fx causality)	$Se \longrightarrow$	$e(t) = E(t)$ is a effort function
Sf		Flow source (fx causality)	$Sf \longleftarrow$	$f(t) = F(t)$ is a flow function
C	Store	Capacitance	$C \swarrow \longleftarrow$	$e = \Phi_C^{-1} \left(\int f dt \right)$ Φ_C is a parametric capacitance function
I		Inertance	$I \longleftarrow$	$f = \Phi_I^{-1} \left(\int e dt \right)$ Φ_I is a parametric inertance function
R	Disipator	Resistance	$R \swarrow \longleftarrow$ $R \longleftarrow$	$e = \Phi_R(f)$ $f = \Phi_R^{-1}(e)$ Φ_C is a parametric resistance function
TF	Transductor	Transformer	$\begin{array}{c} e_1 \\ \longleftarrow \\ f_1 \end{array} \xrightarrow{TF} \begin{array}{c} e_2 \\ \longleftarrow \\ f_2 \end{array}$	$f_2 = nf_1$ $e_1 = ne_2$
GY		Gyrator	$\begin{array}{c} e_1 \\ \longleftarrow \\ f_1 \end{array} \xrightarrow{GY} \begin{array}{c} e_2 \\ \longleftarrow \\ f_2 \end{array}$	$e_2 = rf_1$ $e_1 = rf_2$
0	Junction	0 junction		$e_1 = e_2 = \dots = e_l$ $\sum_{j=1} f_j = 0$
1		1 junction		$f_1 = f_2 = \dots = f_j$ $\sum_{i=1} e_i = 0$

Causality type	Elements	Interpretation
Fixed	SE	$S_e \xrightarrow[e_1]{f_1}$
	SF	$S_f \xleftarrow[f_1]{e_1}$
Constrained	TF	$f_1 \xrightarrow[e_1]{f_2} \text{TF} \xrightarrow[e_2]{f_2}$
		$f_1 \xleftarrow[e_1]{f_2} \text{TF} \xleftarrow[e_2]{f_2}$
		$f_1 \xrightarrow[e_1]{f_2} \text{GY} \xleftarrow[e_2]{f_2}$
Constrained	GY	$f_1 \xleftarrow[e_1]{f_2} \text{GY} \xrightarrow[e_2]{f_2}$
		$f_1 \xrightarrow[e_1]{f_2} \text{GY} \xleftarrow[e_2]{f_2}$
Constrained	Zero junction	$f_1 \downarrow \uparrow$ $f_3 \xrightarrow{0} f_2$

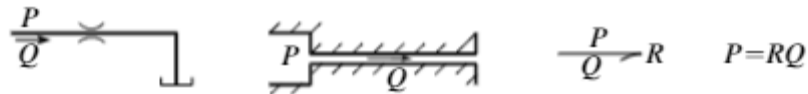
Anexo B Simplificación de fuentes de esfuerzo



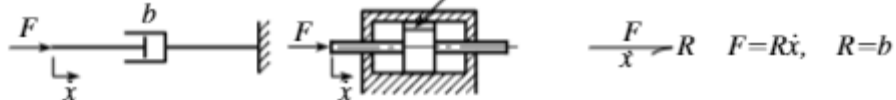
(a) electrical resistance



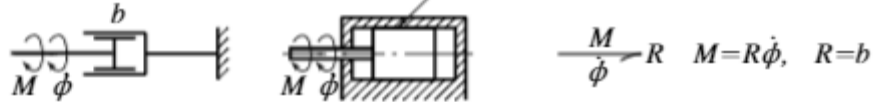
(b) fluid resistance



(c) translational dashpot linear fluid resistance



(d) rotational dashpot thin film of fluid

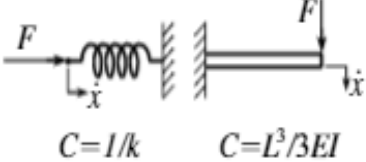
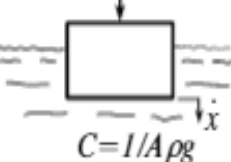

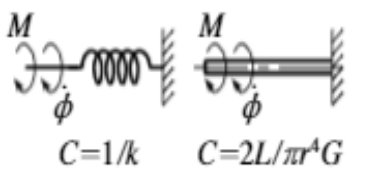


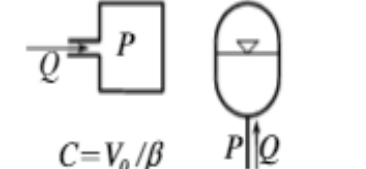

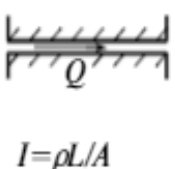
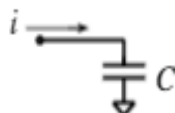
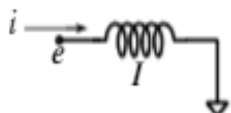


classical symbol

physical example

bond graph relationship

Anexo C Sistema físico primitivo e inercias

	compliance		inertance
	strain	gravity	
translational	 $C=1/k$ $C=L^3/3EI$	 $C=1/A\rho g$	 $I=m$
rotational	 $C=1/k$ $C=2L/\pi r^4 G$	 $C=1/mgr$	 $I=1/2 mr^2$
fluid	 $C=V_0/\beta$ $P Q$	 $C=A/\rho g$	 $I=\rho L/A$
electrical	 C		 I

Anexo D Reglas del Bond Graph

Element	Bond graph	Causal equation	Bloc diagrams	Rule
Effort source	Se:e \longrightarrow	e known	$f \longleftarrow$ System Se:e \longrightarrow System	Output of Se (of Sf) is an effort (flow) and is an input for the system.
Flow source	Sf:f \longleftarrow	f known	$e \longleftarrow$ System Sf:f \longrightarrow System	<i>Rule</i> : The causality is compulsory
Junction 0		$\begin{cases} e_2 = e_1 \\ e_3 = e_1 \\ e_4 = e_1 \\ f_1 = -f_2 + f_3 - f_4 \end{cases}$		Only one effort is allowed to be an input. All others are outputs (here e_1). <i>Rule</i> : Only one bond have causal stroke near a 0 junction.
Junction 1		$\begin{cases} f_2 = f_1 \\ f_3 = f_1 \\ f_4 = f_1 \\ e_1 = -e_2 + e_3 - e_4 \end{cases}$		Only one flow is allowed to be an input. All others are outputs (here f_1). <i>Rule</i> : Only one bond have not a causal stroke near a 1 junction.
TF		$\begin{cases} e_1 = m e_2 \\ f_2 = m f_1 \\ e_2 = \frac{1}{m} e_1 \\ f_1 = \frac{1}{m} f_2 \end{cases}$		Only one effort and one flow may be inputs <i>Rule</i> : One causal stroke near TF
GY		$\begin{cases} e_1 = r f_2 \\ e_2 = r f_1 \\ f_2 = \frac{1}{r} e_1 \\ f_1 = \frac{1}{r} e_2 \end{cases}$		Two efforts or two flows may be inputs <i>Rule</i> : Two causal stroke or no one near GY
C		$e = \Phi_C(\int f dt) = \Phi_C(q)$ $f = \frac{d}{dt}(\Phi_C^{-1}(e))$		Integral causality: effort is an output Derivative causality : flow is an output
I		$f = \Phi_I(\int e dt) = \Phi_I(p)$ $e = \frac{d}{dt}(\Phi_I^{-1}(f))$		Integral causality : flow is an output Derivative causality : effort is an output
R		$e = \Phi_R(f)$ $f = \Phi_R^{-1}(e)$		Resistance causality: output is an effort Conductance causality : flow is an output