

**Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Sistemas y Computación**



**Sistema de Información para la Administración y Análisis de Datos
Adquiridos de Un Exoesqueleto de Marcha Asistida**

Tesis de Maestría en Modalidad Profundización Presentada Por:
Raul Rojas Herrera, Ing.

Santiago de Cali
Junio de 2017



Tesis de Maestría en Modalidad Profundización

Sistema de Información para la Administración y Análisis de Datos Adquiridos de Un Exoesqueleto de Marcha Asistida

Por:

Raul Rojas Herrera, Ing.
1304261
raulrojash@gmail.com

Director:

Eval Bladimir Bacca Cortés, Ph.D.
Profesor Asociado
Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Universidad del Valle
bladimir.bacca@correounivalle.edu.co

Codirector(a):

Beatriz Eugenia Florián Gaviria, Ph.D.
Profesora Asistente
Escuela de Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad del Valle
beatriz.florian@correounivalle.edu.co

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Sistemas y Computación
Maestría en Ingeniería con énfasis en Ingeniería de Sistemas y Computación
Cali, Junio de 2017

Índice General

RESUMEN.....	9
ABSTRACT	11
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	13
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.2.3 PRODUCTOS ESPERADOS	17
1.3 ESTRUCTURA DE LA SOLUCIÓN PLANTEADA	18
1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	19
CAPÍTULO 2 MARCO DE REFERENCIA	21
2.1 ESTADO DEL ARTE	21
2.1.1 HOCOMA'S LOKOMAT	21
2.1.2 HAPTIC WALKER	23
2.1.3 ROBOTIC GAIT REHABILITATION (RGR) TRAINER	26
2.1.4 LOPES (LOWER-EXTREMITY POWERED EXOSKELETON)	29
2.1.5 ANÁLISIS COMPARATIVO	31
2.2 MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	33
2.2.1 FISIOLOGÍA ARTICULAR DE MIEMBROS INFERIORES	33
2.2.2 ESTÁNDARES HL7 (HEALTH LEVEL SEVEN)	35
2.2.3 ARQUITECTURAS DE SOFTWARE	36
2.2.4 JAVA SE	38
2.2.5 POSTGRESQL	38
2.2.6 PROTOCOLO TCP/IP	39
2.2.7 LABVIEW Y SINGLE-BOARD RIO	39
2.2.8 NETBEANS IDE	40
2.2.9 MARCOS DE TRABAJO ÁGIL - SCRUM	40
2.2.10 VISUALIZACIÓN DE DATOS	41
2.3 OBSERVACIONES FINALES	42
CAPÍTULO 3 DISEÑO DEL SISTEMA	43
3.1 ANÁLISIS Y ESPECIFICACIÓN DE REQUERIMIENTOS	43
3.1.1 REQUERIMIENTOS	43
3.1.2 PROTOTIPOS Y/O BOSQUEJOS	46
3.1.3 RESUMEN DE SPRINTS	51
3.2 MODELO DE DATOS	55
4.1 VISTAS DE ARQUITECTURA	66

4.1.1	ESCENARIOS	66
4.1.2	VISTA LÓGICA	70
4.1.3	VISTA DE DESARROLLO.....	75
4.1.4	VISTA DE PROCESO	77
4.1.5	VISTA FÍSICA – MÓDULO DE COMUNICACIÓN.....	81
4.2	IMPLEMENTACIÓN DE LA APLICACIÓN	85
4.2.1	MÓDULO DE HOJA CLÍNICA	85
4.2.2	MÓDULO DE TERAPIA.....	90
4.2.3	MÓDULO DE REPORTES	97
4.2.4	MÓDULO DE CONFIGURACIÓN.....	100
4.3	OBSERVACIONES FINALES.....	103
CAPÍTULO 4 PRUEBAS Y RESULTADOS		104
4.1.	INTRODUCCIÓN	104
4.2.	PRUEBAS FUNCIONALES CICLO I.....	105
4.3.	PRUEBAS FUNCIONALES CICLO II.....	107
4.4.	PRUEBAS NO FUNCIONALES CICLO I	109
4.5.	CONCLUSIONES	109
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....		111
5.1.	CONCLUSIONES	111
5.2.	TRABAJOS FUTUROS.....	112
CAPÍTULO 6 REFERENCIAS		114
CAPÍTULO 7 ANEXOS.....		117

Lista de Figuras

Figura 1.1: Exoesqueleto RUVEM [2]	15
Figura 1.2: Esquema de comunicación del sistema.....	18
Figura 2.1: Sistema Lokomat Pro [3]	21
Figura 2.2: HAPTICWALKER - Rehabilitación de la marcha [4]	23
Figura 2.3: Sistema de Seguridad de la Máquina [4]	24
Figura 2.4: Software de Control [4]	25
Figura 2.5: Interfaz Gráfica de Usuario del Operador PC [4]	26
Figura 2.6: Uso del Robotic Gait Rehabilitation (RGR) Trainer [16].....	27
Figura 2.7: Interfaz Hombre-Máquina (HMI) [15]	28
Figura 2.8: Oblicuidad Pélvica en Sujetos Sanos y Con Discapacidad [15]	29
Figura 2.9: Prototipo LOPES [19]	29
Figura 2.10: Actuadores LOPES [19] [20].....	30
Figura 2.11: LOPES nueva versión [21]	31
Figura 2.12: Movimientos Cadera [17]	34
Figura 2.13: Rodilla - Movimiento de Flexión [17].....	35
Figura 2.14: Tobillo - Movimiento de Flexoextensión [17].....	35
Figura 2.15: Mensaje XML con la información del paciente [23].....	36
Figura 2.16 Arquitectura Cliente/Servidor	37
Figura 2.17 Arquitectura N-Layer.....	37
Figura 2.18 Arquitectura OO.....	37
Figura 2.19 Logo Java	38
Figura 2.20 Logo PostgreSQL	38
Figura 2.21 Logo NetBeans	40
Figura 2.22 Logo Scrum	40
Figura 3.1: Bosquejo Administración del Paciente.....	46
Figura 3.2: Bosquejo Administración del Paciente.....	47
Figura 3.3: Bosquejo Evaluación de Movilidad Articular	47
Figura 3.4: Bosquejo Evaluación de Alteraciones en la Sensibilidad.....	48
Figura 3.5: Bosquejo Evaluación de Debilidad Muscular	49
Figura 3.6: Bosquejo Control Exoesqueleto.....	49
Figura 3.7: Bosquejo Presentación de Datos Obtenidos del Exoesqueleto	50
Figura 3.8: Bosquejo de Módulo de Reportes.....	50
Figura 3.9: Modelo Entidad-Relación.....	57
Figura 3.10: Casos de Uso Módulo Hoja Clínica	67
Figura 3.11: Casos de Uso Módulo de Terapia	68
Figura 3.12: Casos de Uso Módulo de Reportes	69
Figura 3.13: Casos de Uso Módulo de Configuración	69
Figura 3.14: Diagrama de Clases - General	70

Figura 3.15 Diagrama de Clases - Detalle RUVEM	71
Figura 3.16: Diagrama de Clases - Detalle MedicalSheet	72
Figura 3.17: Diagrama de Clases – Detalle Therapy	73
Figura 3.18: Diagrama de Clases - Detalle Reports	74
Figura 3.19: Diagrama de Clases - Detalle Settings	75
Figura 3.20: Diagrama Estilo Arquitectural n-Capas	76
Figura 3.21: Diagrama de Componentes	77
Figura 3.22: Diagrama de Actividades - Administración básica del paciente.....	78
Figura 3.23: Diagrama de Actividades – Caracterizar paciente	79
Figura 3.24: Diagrama de Actividades – Enviar Trayectorias	79
Figura 3.25: Diagrama de Actividades - Controlar Exo	80
Figura 3.26: Diagrama de Actividades – Graficar/Almacenar Datos.....	80
Figura 3.27: Diagrama de Actividades – Generar Reportes	81
Figura 3.28: Diagrama de despliegue	82
Figura 3.29: Cálculo de Longitud de Paso	84
Figura 3.30: Módulo Hoja Clínica - Datos Paciente	86
Figura 3.31: Módulo Hoja Clínica - Diagnóstico Lesiones.....	87
Figura 3.32: Módulo Hoja Clínica - Evaluación Movilidad Articular	88
Figura 3.33: Módulo Hoja Clínica - Alteraciones en la Sensibilidad	89
Figura 3.34: Módulo Hoja Clínica - Evaluación Debilidad Muscular.....	89
Figura 3.35: Módulo Terapia - Panel de Control	90
Figura 3.36: Módulo Terapia - Longitud de Paso.....	91
Figura 3.37: Módulo de Terapia - Tiempo de Paso.....	92
Figura 3.38: Módulo de Terapia - Longitud de Zancada	92
Figura 3.39: Módulo de Terapia - Velocidad de la Marcha	93
Figura 3.40: Módulo de Terapia - Ángulo de Cadera.....	94
Figura 3.41: Módulo de Terapia - Ángulo de Rodilla.....	95
Figura 3.42: Módulo de Terapia - Ángulo de Tobillo	95
Figura 3.43: Módulo de Terapia - Indicadores de Presión	96
Figura 3.44: Módulo de Terapia - Indicadores de Electromiografía	97
Figura 3.45: Módulo de Reportes	98
Figura 3.46: Módulo de Reportes - Generación de un Reporte	98
Figura 3.47: Reporte en Formato PDF	99
Figura 3.48: Reporte HL7 FHIR en formato JSON	100
Figura 3.49: Módulo de Configuración - Trayectorias	101
Figura 3.50: Módulo de Configuración - Parámetros de Trayectorias.....	101
Figura 3.51: Módulo de Configuración - Parámetros de Marcha	102
Figura 3.52: Módulo de Configuración - Parámetros de Conexión	103

Listado de Tablas

Tabla 1.1 Productos Esperados.....	17
Tabla 2.1: Análisis comparativo software de dispositivos para rehabilitación de la marcha ...	31
Tabla 3.1 Historia de Usuario del Módulo de la Hoja Clínica	43
Tabla 3.2 Historia de Usuario del Módulo de Instrumentación.....	44
Tabla 3.3 Historia de Usuario del Módulo de Reportes	45
Tabla 3.4: Resumen de los Sprints ejecutados en el proyecto	51
Tabla 3.5: Descripción de las entidades de la Base de Datos	58
Tabla 3.6: Trama envío de trayectorias	82
Tabla 3.7: Tramas para control de Exo.....	83
Tabla 3.8: Trama para recepción de datos monitoreo	83
Tabla 4.1: Matriz de clasificación de No Conformidades	105
Tabla 4.2: Estadísticas resultado de pruebas funcionales Ciclo I	106
Tabla 4.3: Estadísticas resultado de pruebas funcionales Ciclo II	108

Listado de Ecuaciones

Ecuación (3.1).....	85
Ecuación (3.2).....	85
Ecuación (3.3).....	85
Ecuación (3.4).....	85
Ecuación (3.5).....	85
Ecuación (3.6).....	85
Ecuación (3.7).....	93



AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer principalmente a la Universidad del Valle, por ser la institución que me ha permitido alcanzar los logros académicos que me he propuesto. A los Doctores Bladimir Bacca, José Miguel Ramírez y Beatriz Eugenia Florián, por darme la oportunidad de participar en el Proyecto Marcha asistida con un exoesqueleto, por su paciencia y por su disposición a colaborarme en el cumplimiento de los objetivos. A mi familia, compañeros, amigos y a todas las personas que me han apoyado en el crecimiento personal y profesional. Muchas gracias a todos.



RESUMEN

Los robots diseñados para el campo de la medicina son un tema en auge, que plantea muchos retos a los investigadores de las instituciones que desean incursionar en este ámbito, con el fin de dar solución a diferentes problemáticas en el área de la salud a través de este tipo de dispositivos. Es por esto que surge el actual proyecto, cuyo objetivo es aportar desde el frente de software, a una solución integral que busca mejorar la calidad de vida de las personas que han sufrido diferentes lesiones que limitan la movilidad en miembros inferiores. La solución del Proyecto Marcha asistida con un exoesqueleto [2] se centra principalmente en el uso de un exoesqueleto para el entrenamiento de la marcha en personas que presentan un déficit de la misma. Sin embargo, el hardware no es el único componente del proyecto, puesto que es importante la implementación de un sistema de información que permita hacer la caracterización de los pacientes, almacenar y visualizar la información generada por el exoesqueleto, al igual que generar reportes sobre los resultados obtenidos en el entrenamiento de la marcha de los pacientes.

Para dar cumplimiento a la implantación de un software para la administración y análisis de datos adquiridos del exoesqueleto RUVEM [2], se lleva a cabo una revisión del estado del arte de los exoesqueletos del mismo tipo que han sido desarrollados a nivel mundial. De esta manera, se identificó la forma en la que dieron solución al componente de software, llegando a la conclusión de construir un aplicativo a la medida. Esto debido a que cada exoesqueleto revisado en el estado del arte contaba con un software que se acoplaba a la instrumentación del mismo, y no se evidenció el uso de un software genérico que pudiera fácilmente configurarse a cualquier dispositivo.

Los requisitos que dieron lugar al desarrollo del software, se componen principalmente por un módulo de hoja clínica; el cual permite registrar los datos del paciente, entre ellos sus lesiones y evaluaciones físicas realizadas por el fisioterapeuta. Un módulo de terapia, encargado de la comunicación con el exoesqueleto, y la presentación de la información en gráficas. Finalmente, un módulo de reportes que genera en formatos estándares la información obtenida en las sesiones de marcha del paciente con el exoesqueleto. El proceso de desarrollo se llevó a cabo bajo metodologías ágiles, usando el marco de trabajo Scrum [12] como referencia para la recolección de los requisitos y la implementación de los requerimientos en periodos de 2 semanas, llevando a cabo un desarrollo evolutivo del software, realizando validaciones y

ajustes constantemente, hasta conseguir la versión deseada por cada uno de los actores involucrados en la especificación.

El software fue desarrollado usando herramientas y librerías de licencias libres, tales como el manejador de bases de datos PostgreSQL [7], el lenguaje de programación Java, en su edición estándar para el desarrollo del sistema y la versión FX para el desarrollo de las gráficas por medio de las cuales se visualiza la información generada por el exoesqueleto [8], el entorno de desarrollo NetBeans [11], entre otros. El uso de este tipo de tecnologías permite aprovechar ventajas como la de trabajar con componentes de software que han sido probados por muchos desarrolladores alrededor de mundo, y presentan un índice bajo de errores; son gratuitos y hay una comunidad de desarrolladores activa y en crecimiento que aportan con soluciones a problemas que se puedan presentar.

Las pruebas aplicadas al software condujeron a la identificación de 5 no conformidades, que se relacionaban con 4 de las funcionalidades del sistema. En el proceso de pruebas de software se ejecutaron 295 casos de prueba funcionales y 1 prueba no funcional relacionada con la interoperabilidad del software con el exoesqueleto, ejecutadas en 2 ciclos de pruebas. Finalmente, luego de la corrección de los errores y la ejecución del ciclo 2, los resultados fueron satisfactorios teniendo un índice de correctitud del 100%, lo que indica que las funcionalidades evaluadas se comportan de acuerdo a lo esperado.



ABSTRACT

Robots designed for the medical field are a growing topic, which poses many challenges for researchers from institutions wishing to enter this field, in order to solve different health problems through this type of devices. This is why the current project arises, whose goal is to provide from the software front, a comprehensive solution that seeks to improve the quality of life of people who have suffered different injuries that limit mobility in lower limbs. The solution of the Project Assisted Walk with an exoskeleton [2] focuses mainly on the use of an exoskeleton for the training of the gait in people who present a deficit of the same. However, hardware is not the only component of the project, since it is important to implement an information system that allows the characterization of patients, store and visualize the information generated by the exoskeleton, as well as generate reports on the results obtained in the training of patients' gait.

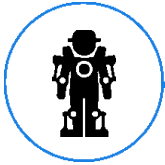
In order to comply with the implementation of software for the administration and analysis of data acquired from the RUVEM exoskeleton [2], a state-of-the-art review of exoskeletons of the same type has been carried out worldwide. In this way, the way in which they solved the software component was identified, concluding to build a custom application. This was because each exoskeleton reviewed in the state of the art had software that was coupled to the instrumentation of the same, and did not show the use of generic software that could easily be configured to any device.

The requirements that gave rise to the development of the software, are composed mainly by a clinical leaf module; which allows recording the patient's data, including his injuries and physical evaluations performed by the physiotherapist. A therapy module, responsible for communication with the exoskeleton, and the presentation of information in graphs. Finally, a report module that generates in standard formats the information obtained in the patient's walking sessions with the exoskeleton. The development process was carried out under agile methodologies, using the Scrum framework [12] as a reference for the collection of the requirements and the implementation of the requirements in 2-week periods, carrying out an evolutionary development of the software, making validations and adjustments constantly, until getting the version desired by each of the actors involved in the specification.

The software was developed using free license tools and libraries, such as the PostgreSQL database manager [7], the Java programming language [8], in its standard edition for system

development and the FX version for the development of graphs by means of which the information generated by the exoskeleton [8], the NetBeans development environment [11], and others are displayed. The use of this type of technology allows to take advantages such as working with software components that have been tested by many developers around the world, and have a low error rate; are free and there is an active and growing community of developers that provide solutions to problems that may arise.

The tests applied to the software led to the identification of 5 nonconformities, which related to 4 of the system's functionalities. In the software testing process, 295 functional test cases and 1 non-functional test related to interoperability of the software with the exoskeleton were executed, executed in 2 test cycles. Finally, after the correction of the errors and the execution of cycle 2, the results were satisfactory having a correctness index of 100%, which indicates that the evaluated functionalities behave as expected.



Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día la tecnología robótica se encuentra inmersa en casi todos los campos de trabajo, como el militar, la salud, entre otros, siendo la medicina uno de los más beneficiados. En esta área en particular la tecnología robótica facilita tanto el trabajo de los médicos, como la recuperación de los pacientes [1].

Los exoesqueletos son una de las herramientas que se han venido desarrollando con el objetivo de mejorar la calidad de vida de las personas, en el ámbito de la medicina. Un exoesqueleto básicamente es una estructura para ser usada sobre el cuerpo humano, tal como una prenda de vestir, en inglés el término para nombrar este tipo de tecnología es “Wearable Robots”, que están siendo desarrollados para asistir los movimientos y/o aumentar las capacidades del cuerpo humano. Estas estructuras pueden ser pasivas o activas, o sea que contengan o no actuadores¹ para el movimiento y a su vez, requieran de sistemas de control asociados al accionamiento de dichos actuadores [1].

En general los exoesqueletos diseñados para el campo de la medicina, se adaptan al cuerpo y están dotados de sistemas inteligentes de procesamiento y adquisición de datos, para la toma de decisiones en la ejecución de alguna función por medio de los actuadores. Dentro del campo de la electrónica, se identifican como partes fundamentales del sistema, la instrumentación electrónica y el control. La instrumentación se encarga de recolectar información útil para ser enviada a un procesador central, el cual ejecuta las estrategias de control necesarias para regular la conducta de la instrumentación electrónica, basado en la información recibida [1].

El grupo de investigación en Control Industrial de la Universidad del Valle (GICI²), ha venido trabajando sobre un exoesqueleto de miembros inferiores para la rehabilitación de la marcha, conocido como *Rehabilitación en UV con Exoesqueleto para Marcha (RUVEM)*. Este proyecto se enfoca en apoyar la movilidad de personas con lesiones de médula espinal, secuelas de Enfermedad Cerebrovascular (ECV), Traumas Craneoencefálicos y pacientes que requieran terapia física [2].

¹ Actuador: parte del exoesqueleto que ejerce la fuerza necesaria para mover el exoesqueleto y la persona que lo usa.

² <http://www.univalle.edu.co/~automatica/investigacion/>

Dentro de los componentes esenciales de una solución basada en un Exoesqueleto para la rehabilitación de la marcha, se encuentra el software para la recuperación y visualización de la información generada por el exoesqueleto. Este software debe ser diseñado pensando en la interacción que tendrá con el profesional de la salud, quien registrará la información del paciente, hará anotaciones durante la sesión, interpretará los resultados visualizados a través del software y seleccionará los registros de sesiones de marcha deseados para que el sistema genere los reportes correspondientes. El estudio del estado del arte evidencia que en diferentes proyectos a nivel mundial, tales como el sistema “Lokomat” de la compañía Hocoma [3], el robot “Haptic Walker” desarrollado en Alemania por el ingeniero Henning Schmidt [4], el sistema “LokoHelp” de la compañía WoodWay [5], el sistema “G-EO-Systems” de la compañía Reha Technology AG [6], entre otros, el software desarrollado para cada dispositivo robótico, en general ha sido hecho a la medida. Estos desarrollos han tenido en cuenta las características de hardware de cada dispositivo y el tratamiento que se quiera dar a la información adquirida desde el sistema robótico. De acuerdo a lo que se evidencia en diferentes proyectos a nivel mundial, no es posible encontrar una herramienta de software que pueda adaptarse a las características físicas de cada exoesqueleto en particular, y adicionalmente satisfacer otras necesidades que no se relacionan directamente con el dispositivo, tales como el registro de información del paciente. Por lo tanto una buena práctica en el desarrollo de un nuevo proyecto que incluya un exoesqueleto para la rehabilitación de la marcha, será la implementación del software hecho a la medida, para la recuperación y visualización de la información, lo cual es el objetivo de este proyecto.

1.1 Planteamiento del Problema

Actualmente la escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle, tiene a su cargo el proyecto *Marcha Asistida con un Exoesqueleto* [2], el cual es financiado por COLCIENCIAS³, y en el que se encuentran trabajando los grupos de investigación SINERGIA, Grupo de Investigación en Percepción y Sistemas Inteligentes (PSI) y el Grupo de Investigación en Control Industrial (GICI). El proyecto de construcción de un exoesqueleto tuvo origen al revisar el estado del arte de los dispositivos, y evidenciar que los costos de adquisición de un exoesqueleto con las características deseadas, sobrepasaba los costos estimados si se optara por la construcción del mismo. El objetivo del proyecto es lograr el control de un exoesqueleto artificial de miembros inferiores, con la finalidad de asistir a un humano durante la marcha y el equilibrio. En esta fase del proyecto se trabajarán tres niveles de control, el primero es el diseño y ajuste de controles a nivel de los actuadores para garantizar el seguimiento de trayectorias, el segundo es el diseño y ajuste de un control de

³ Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS) es la entidad encargada de promover las políticas públicas para fomentar la ciencia, la tecnología y la innovación en Colombia.

marcha (generador de trayectorias) que tenga en cuenta la interacción Hombre-Máquina, y finalmente el diseño e implementación de un sistema de supervisión utilizando técnicas de visión artificial.

El exoesqueleto RUVEM dentro de su instrumentación cuenta con los siguientes sensores para la captura de información durante la marcha del paciente, 6 sensores de ángulo (KMA200), ubicados en cadera lado izquierdo, cadera lado derecho, rodilla izquierda, rodilla derecha, tobillo izquierdo y tobillo derecho, 4 sensores de aceleración (SDXL330), ubicados 2 en tibias y 2 en fémures, 8 sensores de presión (FlexiForce) ubicados en la zona plantar, 4 en cada pie, un sensor giróscopo (ADIS16355) y 4 sensores de electromiografía móviles. A continuación en la Figura 1.1 se presenta una ilustración de la instrumentación del exoesqueleto y cómo se adapta al cuerpo del paciente para la ejecución de la marcha.



Figura 1.1: Exoesqueleto RUVEM [2]

A partir de los sensores en el exoesqueleto, se obtienen variables espacio-temporales y cinemáticas, que determinan el patrón de marcha generado por el paciente. Dentro de las variables espacio-temporales encontramos la longitud de paso, el tiempo de paso, longitud de la zancada y la velocidad de la marcha. Para las variables cinemáticas tenemos los ángulos de cadera, rodilla y tobillo, los sensores de presión y de electromiografía.

Teniendo en cuenta que para este tipo de sistemas de rehabilitación no existe un software genérico que pueda suplir las necesidades específicas relacionadas al hardware y al personal médico, es necesario diseñar e implementar una herramienta software, para dar cumplimiento a los objetivos del proyecto *Marcha asistida con un exoesqueleto* desarrollado por la

Universidad del Valle. Esta herramienta debe permitir la administración de la información generada por el exoesqueleto, y la presentación de dicha información en gráficas visualmente significativas para el fisioterapeuta durante la sesión de rehabilitación de la marcha, al igual que la generación de reportes a partir de la información almacenada.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema de información para la administración y análisis de datos adquiridos de un exoesqueleto de marcha asistida.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Elaborar un estado del arte del software utilizado para la administración y análisis de datos en diferentes exoesqueletos de marcha asistida.
2. Diseñar e implementar una base de datos para almacenar la información adquirida del exoesqueleto y la información a registrar por los fisioterapeutas.
3. Evaluar e implementar técnicas y herramientas de desarrollo Open Source, que sean las más adecuadas para la implementación de la aplicación.
4. Diseñar e implementar un módulo de hoja clínica para registrar la caracterización del paciente, previo a las sesiones de rehabilitación de la marcha con el exoesqueleto.
5. Diseñar e implementar un módulo de conexión que permita la transmisión de datos desde y hacia el exoesqueleto a través de una red LAN, y su posterior almacenamiento en la base de datos.
6. Diseñar e implementar un módulo de terapia, que permita presentar al fisioterapeuta la información capturada del exoesqueleto en gráficas visualmente significativas, que le brinden apoyo en la toma de decisiones respecto al tratamiento de los pacientes.
7. Diseñar e implementar un módulo de reportes, para extraer de la base de datos la información en diferentes formatos de manera dinámica.
8. Elaborar y ejecutar un plan de pruebas funcionales al software desarrollado y presentar informe de resultados.

1.2.3 Productos Esperados

Tabla 1.1 Productos Esperados

Objetivos Específicos	Productos Esperados	Documentación
Estado del Arte de Software en diferentes exoesqueletos	Revisión del estado del arte del Software implementado para diferentes dispositivos exoesqueletos, realizando un análisis comparativo logrando identificar los componentes más relevantes para desarrollar en un Software de este tipo.	Sección 2.1
Base de Datos	Diseño e implementación de una base de datos relacional, que contemple los conceptos necesarios en la solución software desarrollada.	Sección 3.2, Anexo F que contiene el código fuente, Anexo G que contiene los instaladores.
Herramientas Open Source	Evaluación de las herramientas, librerías, APIs, lenguajes de programación, que sean open source y que más se adecúan para el desarrollo del actual proyecto.	Sección 2.2
Módulo de Hoja Clínica	Diseño e implementación de un módulo que permita el registro de la información característica del paciente.	Sección 3.4.1
Módulo de Conexión	Desarrollo de un módulo de conexión que permita la comunicación con el exoesqueleto en doble vía.	Sección 3.3.5
Módulo de Terapia	Diseño e implementación de un módulo de terapia que permita la presentación de la información capturada del exoesqueleto en gráficas visualmente significativas para el fisioterapeuta. También, que permita el control del exoesqueleto en modo activo y contenga el módulo de conexión para lograr esta comunicación con el exoesqueleto.	Sección 3.4.2
Módulo de Reportes	Diseño e implementación de un módulo de reportes que permita recuperar la información almacenada en la base de datos para las sesiones de marcha del paciente con el exoesqueleto.	Sección 3.4.3, Anexo A que contiene el una muestra del reporte PDF, Anexo B que contiene el una muestra del reporte HL7

Plan de Pruebas	Documento de plan de pruebas con las evidencias de diseño, ejecución y resultados de pruebas funcionales y no funcionales.	Sección Capítulo 4, Anexo C que contiene el plan de pruebas, Anexo D que contiene un video con la prueba de interoperabilidad
-----------------	--	---

1.3 Estructura de la Solución Planteada

Teniendo en cuenta la problemática presentada se realizó un análisis, respecto a las necesidades de registro, presentación y almacenamiento de información relevante para el Fisioterapeuta durante las sesiones de rehabilitación de la marcha, logrando identificar las funcionalidades esenciales que dieran cumplimiento a los requerimientos de usuario. A continuación en la Figura 1.2 se presenta un diagrama que resume los componentes más importantes involucrados en el sistema y la comunicación entre ellos, donde se puede identificar el exoesqueleto RUVEM que interactúa a través de una tarjeta NI sbRIO la cual se encarga de la lectura y control de la instrumentación del exoesqueleto, enviando la información a través del protocolo TCP/IP hacia el servidor LabView. El servidor LabView se encarga de traducir la información recibida a un mecanismo de comunicación con la aplicación software basado en cadenas de texto, que son analizadas, almacenadas y graficadas en la aplicación, quedando la información disponible para su posterior consulta. Usando el mismo mecanismo se envía información desde el software hacia el exoesqueleto.

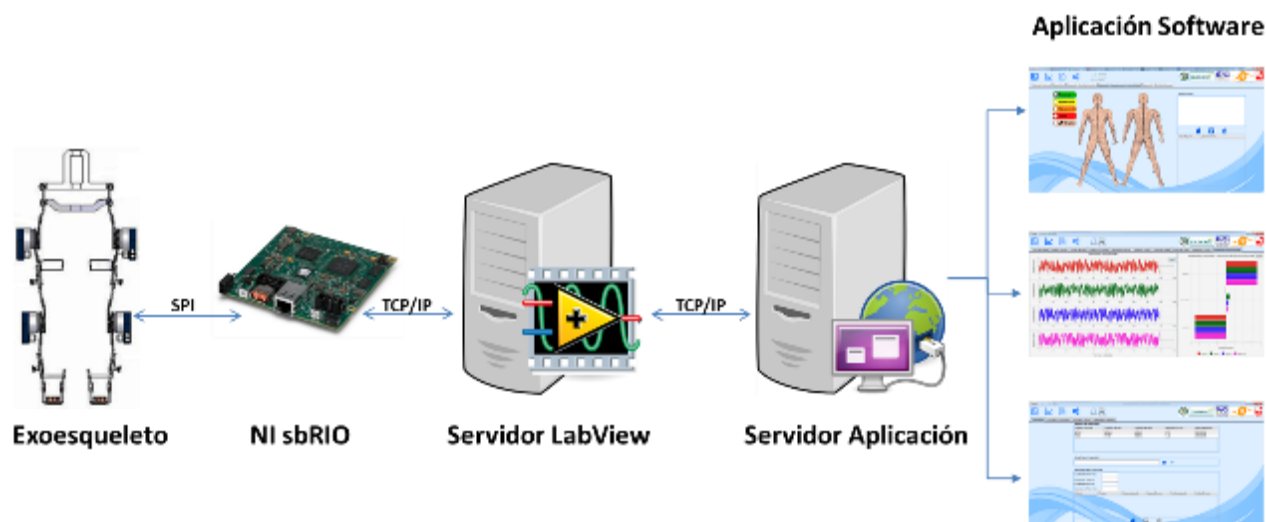


Figura 1.2: Esquema de comunicación del sistema

1.4 Estructura del Documento

En este documento se presenta una propuesta para el desarrollo de un sistema de información, que sea de apoyo a la gestión del profesional de la salud, quien se encarga de la manipulación del exoesqueleto de marcha asistida RUVEM, durante las sesiones de entrenamiento de la marcha con pacientes en rehabilitación de la movilidad en sus miembros inferiores. El sistema a desarrollar contará con 3 módulos principalmente, en el primer módulo se encuentra la administración de la Hoja Clínica, en la cual se registra información general del paciente, descripción de lesiones previas, resultados de evaluación de sensibilidad y resultados de evaluación de debilidad muscular.

El segundo módulo es el de Terapia, que permite al profesional de la salud poder observar el movimiento de un paciente, mientras realiza la marcha usando el exoesqueleto, a través de gráficas visualmente significativas, que muestran la información generada por el dispositivo en la medida que se van realizando los movimientos. En el segundo módulo se encapsula el componente o módulo de conexión, el cual implementa la comunicación entre el software y el exoesqueleto a través de la red LAN. Finalmente, el tercer módulo comprende la generación de reportes posteriores a la terapia, que pueden ser obtenidos por diferentes criterios y en diversos formatos, tales como PDF, CSV, y el estándar HL7.

El documento está organizado en siete secciones. En la sección 1, se describe detalladamente el problema objeto de estudio y la propuesta de solución. Se incluye una justificación basada en la importancia de dar solución al problema planteado y se presentan el objetivo general y los objetivos específicos que se planean alcanzar con el desarrollo del proyecto.

En la sección 2, se presentan el marco teórico y estado del arte. En el marco teórico se describen, brevemente, los distintos conceptos, tecnologías y herramientas a utilizar. En el estado del arte se muestran algunas aplicaciones que presentan características similares a las de este proyecto, ya sea por su funcionamiento y/o finalidad.

En la sección 3, se detalla los requerimientos iniciales que dieron lugar al desarrollo del software, los bocetos preliminares de la interfaz gráfica y el diseño de arquitectura del software, pasando por sus vistas lógica, de procesos, desarrollo y física, así como los escenarios que se definieron como requisito para el desarrollo del software, finalizando la sección con una descripción de las funcionalidades y componentes gráficos comprendidos en la aplicación.

En la sección 4, se relacionan los resultados obtenidos de las pruebas funcionales y de integración para cada uno de los módulos de la aplicación, donde se evidencia su correcto funcionamiento bajo los parámetros evaluados.

En la sección 5, se concluye respecto al cumplimiento de los objetivos y el aprendizaje adquirido en la ejecución del proyecto, además se presentan ideas para la continuación del proyecto en trabajos futuros que permitan ampliar muchos más el alcance definido en este proyecto.

En la sección 6 y 7, se registran las referencias bibliográficas que soportan las bases teóricas en las que se basa el actual proyecto, y los anexos respectivamente.



Capítulo 2 MARCO DE REFERENCIA

El propósito de este capítulo es presentar los conceptos, definiciones y aspectos metodológicos que se tuvieron en cuenta para el desarrollo de este proyecto. En el marco teórico se describe la metodología de desarrollo, los conceptos más relevantes, las herramientas y tecnologías a usar como base en la etapa de desarrollo de software. En el estado del arte se presentan algunos sistemas con los que por su funcionamiento o finalidad, encontramos similitudes con el sistema planteado en la propuesta de solución.

2.1 Estado del Arte

En esta sección se presentan algunos exoesqueletos que tienen características similares a las de RUVEM, ya sea por su funcionamiento y/o finalidad, y se hace una identificación del tipo de software utilizado para la captura y presentación de datos del exoesqueleto.

2.1.1 Hocoma's Lokomat

Hocoma es una compañía de tecnología médica, que fue fundada en el año 1996, con sede en Zurich Suiza. Es líder en la terapia de rehabilitación robótica, para los trastornos neurológicos que afectan el movimiento. Desarrollan soluciones de terapia innovadora, trabajando en estrecha colaboración con las principales clínicas y centros de investigación Suizos [3].



Figura 2.1: Sistema Lokomat Pro [3]

El sistema Lokomat (ver Figura 2.1) asiste en los movimientos al caminar a pacientes con problemas de marcha, es usado para mejorar la movilidad en personas que han sufrido accidente cerebrovascular, lesión de médula espinal, parálisis cerebral y esclerosis múltiple, así como otras enfermedades y lesiones neurológicas. Este producto ha estado en el mercado desde el año 2001, mejorando cada vez en el arte y la ciencia de la terapia de locomoción. Este producto se generó en actividades de investigación y desarrollo en el Hospital Universitario Balgrist [3].

A continuación se describe brevemente el sistema Lokomat y se hace una introducción a sus principales características y funciones, con el fin de proporcionar una idea general de sus componentes, funcionamiento y alcance.

- ❖ LokomatPro consiste en la órtesis robótica para la marcha, el sistema de apoyo del peso corporal y una caminadora. La orientación es controlada desde un computador, lo que permite realizar ajustes de los diferentes parámetros de la marcha [3].
- ❖ La terapia de locomoción automatizada en una caminadora usa motores controlados por computador, que se integran a la órtesis en cada articulación de la cadera y la rodilla. Transductores de fuerza en las articulaciones, miden con precisión la interacción entre el paciente y el exoesqueleto. Se realiza una sincronización entre la velocidad de la caminadora y la órtesis [3].
- ❖ En el patrón de marcha fisiológica los ángulos de las articulaciones en la cadera y rodilla, son controlados en tiempo real por el software. Cada una de las cuatro articulaciones es constantemente monitoreada por el software, para asegurar que concuerdan con la forma de caminar predefinida[3].
- ❖ La órtesis permite ajustes individuales a la anatomía del paciente para su comodidad [3].
- ❖ Una interfaz de usuario permite al terapeuta operar con facilidad el LokomatPro, y ajustar los parámetros de entrenamiento en una pantalla táctil, para satisfacer las necesidades de cada paciente, en cualquier momento durante la sesión [3].
- ❖ Proporciona información funcional motivadora, estimulante e instructiva en entornos virtuales. Anima al paciente al cumplimiento de los objetivos, a través de simulación en entornos de realidad virtual [3].
- ❖ Apoyo del peso corporal para personas en silla de ruedas, permite suspender al paciente, para realizar la sesión de entrenamiento sobre la caminadora [3].
- ❖ Se espera lanzar nuevas versiones en el futuro, con mejoras en opciones como los grados de libertad, control sofisticado, mayor velocidad en la marcha, entre otras [3].

- ❖ Proporcionan una evaluación continua de las funciones motoras del paciente, y permiten el seguimiento del progreso de la recuperación y la precisa evaluación de las habilidades del paciente [3].

2.1.2 Haptic Walker

Haptic Walker es un Robot para la rehabilitación de la marcha, desarrollado en Alemania en el año 2004, por el ingeniero Henning Schmidt, con el objetivo de facilitar la recuperación de los enfermos que han sufrido un accidente cerebrovascular, lesión de la médula espinal y lesión cerebral traumática.

Este sistema consta de dos módulos que contiene cada un brazo mecánico con una plataforma que permite fijar cada pie del paciente. Cada uno de estos módulos contiene un sensor de fuerza de torsión, para controlar las fuerzas de contacto entre el pie del usuario y la máquina [4].

En la Figura 2.2 se puede observar el robot siendo usado por un paciente, con la asistencia de un profesional de la salud encargado de operar el dispositivo.



Figura 2.2: HAPTICWALKER - Rehabilitación de la marcha [4]

La seguridad del usuario es muy importante, por lo tanto el sistema tiene integrado un mecanismo de seguridad que incluye varios componentes, tal como se muestra en la Figura 2.3.

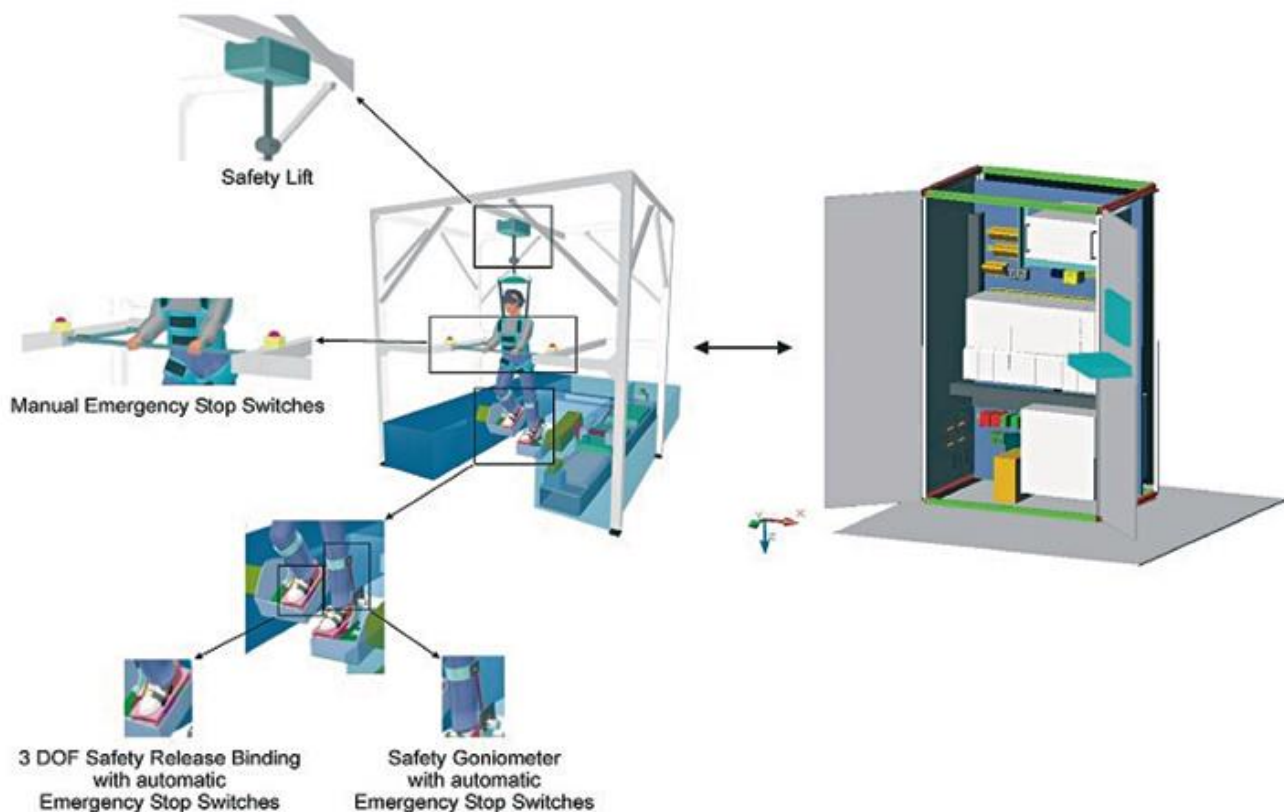


Figura 2.3: Sistema de Seguridad de la Máquina [4]

El sistema de seguridad implementa interruptores de emergencia manuales, interruptores automáticos de emergencia, control desde el PC. Un dato importante es que el circuito de los interruptores de emergencia está conectado independientemente del software de control [4].

La arquitectura del software de control del robot, se deriva de la NASREM (NASA/NBS Standard Reference Model for Telerobot Control System Architecture), tomado como diseño de referencia y modificado para usarse como controlador de robot. La implementación del software de control se realizó con base en el sistema operativo Linux/RTLinux. Es un software de control multirobot que fue diseñado para uso con diferentes tipos de robots y su cinemática [4].

En la Figura 2.4 es posible observar los componentes que hacen parte del software de control, y su relación.

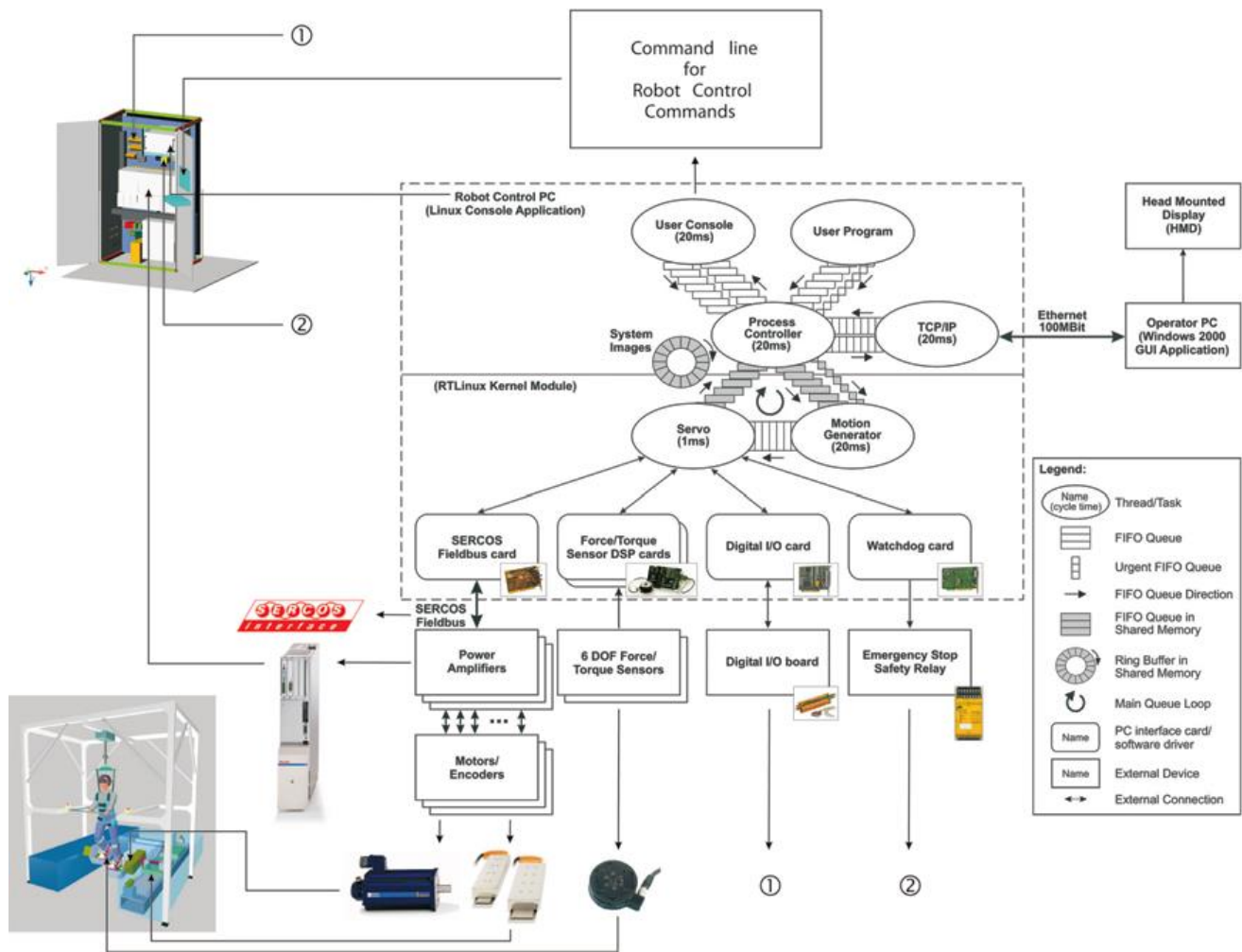


Figura 2.4: Software de Control [4]

El Software Operador consiste en una interfaz gráfica de usuario basada en MS Windows. El diseño GUI elegido se deriva en parte del diseño de interfaces de programación de robots industriales (por ejemplo, KUKA y SIEMENS 840D). Se divide en 3 partes principales: área de estado, zona de trabajo y zona de botones programables.

La ventana de generación de trayectoria (Figura 2.5), se ha diseñado principalmente para su uso por personal de servicio médico, durante las sesiones de rehabilitación de la marcha. Allí, el operador puede sintetizar las trayectorias del pie sobre la base de los parámetros predominantes de la marcha (la longitud del paso, altura de paso, cadencia). La síntesis de la trayectoria se basa en la modificación de una trayectoria principal arbitraria, que se carga primero y posteriormente es modificada [4].

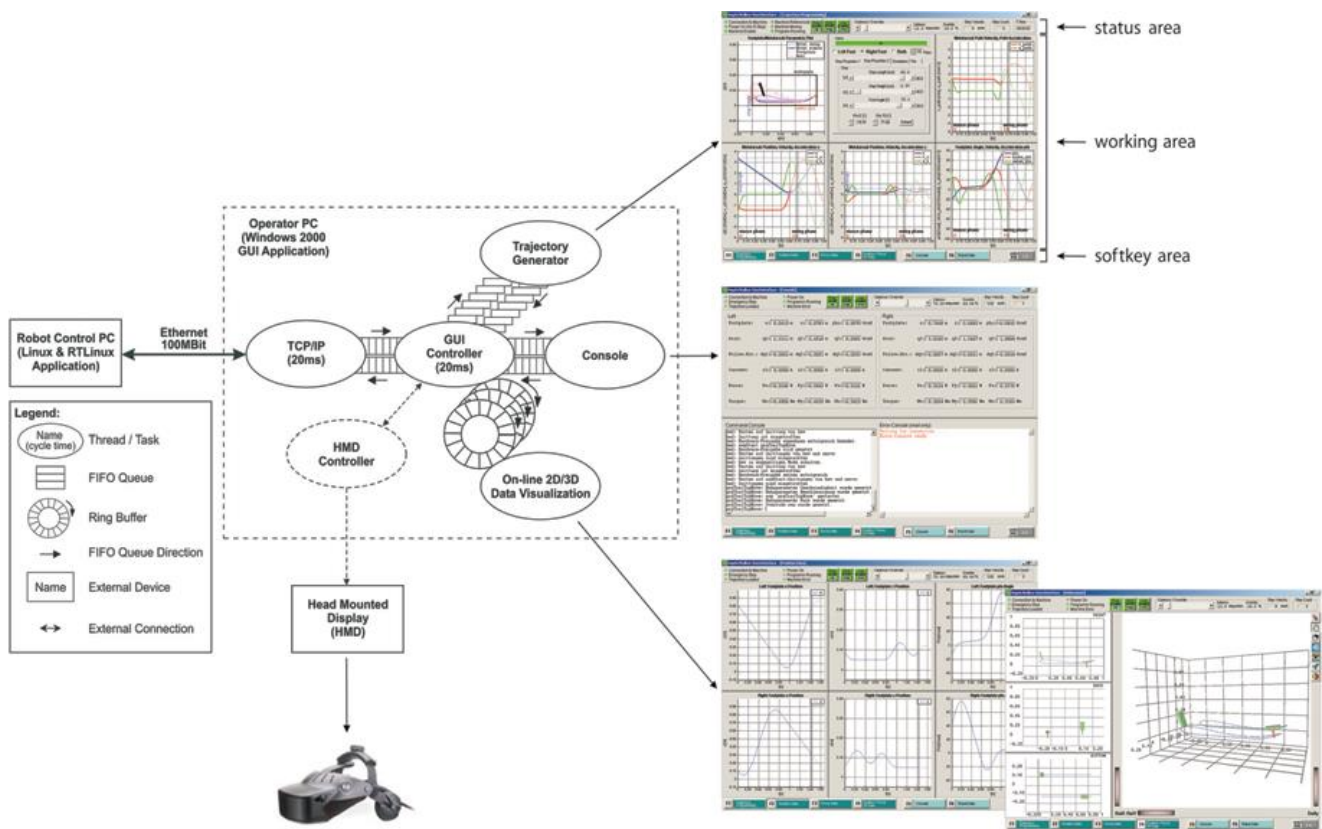


Figura 2.5: Interfaz Gráfica de Usuario del Operador PC [4]

En la Figura 2.5 se puede observar que la GUI posee gran flexibilidad para permitir la operación del robot de manera remota, realizando el diagnóstico en línea. Varias ventanas para la visualización de los datos en dos y tres dimensiones, donde se visualizan los datos capturados (Posición, fuerza, torque, corriente del motor, etc.) en tiempo real [4].

2.1.3 Robotic Gait Rehabilitation (RGR) Trainer

El entrenador robótico de rehabilitación de la marcha, es un desarrollado conjunto entre el Laboratorio de Mecatrónica Biomédica de la Universidad del Noreste (Northeastern University) y el Laboratorio de Análisis del Movimiento del Hospital de Rehabilitación Spaulding, la cual es una institución afiliada a la Facultad de Medicina de Harvard, en el año de 2011 en la ciudad de Boston (Massachusetts, United States) [16].

En la Figura 2.6, es posible observar el sistema RGR siendo usado por un paciente.



Figura 2.6: Uso del Robotic Gait Rehabilitation (RGR) Trainer [16]

Los principales objetivos de la investigación y el desarrollo son:

- ❖ El desarrollo (diseño y fabricación) de un dispositivo robótico, llamado Robotic Gait Rehabilitation (RGR) Trainer, creado para facilitar el reentrenamiento de la marcha sobre una caminadora, en pacientes con patrones de marcha anormales asociados con un exagerado y descoordinado (con otros segmentos corporales) movimiento de la pelvis. Centrando la atención en la corrección del senderismo de la cadera (es decir movimientos exagerados ascendentes y unilaterales de un lado de la pelvis), y rotaciones anormales de la pelvis en pacientes que han sufrido un accidente cerebrovascular [16].
- ❖ El diseño e implementación de estrategias de control de impedancia de alto nivel, que dependen de actuadores rápidos, biológicamente realistas y trayectorias de referencia clínicamente factibles de movimiento de la pelvis, y el monitoreo en tiempo real (a través de la tecnología de sensores en miniatura) de los patrones de marcha del sujeto durante el entrenamiento robótico, para lograr una buena interacción entre humano y robot, facilitando así el reentrenamiento de la marcha [16].
- ❖ La realización de pruebas del dispositivo, generando una retroalimentación háptica y visual, en pacientes que han sufrido un accidente cerebrovascular. Utilizando datos de voluntarios sanos y de sobrevivientes hemipléjicos de accidentes cerebrovasculares, igualmente crear programas de capacitación para ayudar a los pacientes en el restablecimiento de un patrón de marcha clínicamente deseable [16].

En el diseño de la Interfaz Hombre-Máquina (HMI) del RGR Trainer el enfoque principal es el control del ángulo de oblicuidad pélvica. Por lo tanto, es importante en el diseño del exoesqueleto que la oblicuidad pélvica no se obstaculice de forma explícita por la orientación del torso en el plano frontal [15]. En la Figura 2.7, se puede observar los componentes principales del sistema RGR.



Figura 2.7: Interfaz Hombre-Máquina (HMI) [15]

La presentación de los datos arrojados por el dispositivo, se realiza en un PC en tiempo real, usando el software **LabVIEW Real-Time**, desarrollado por la empresa National Instruments [15]. Esta es una solución completa para crear sistemas embebidos autónomos y confiables con un enfoque de programación gráfica. En la Figura 2.8 se presenta un modelo de gráfica generada a través del sistema LabView, para el ángulo de oblicuidad pélvica.

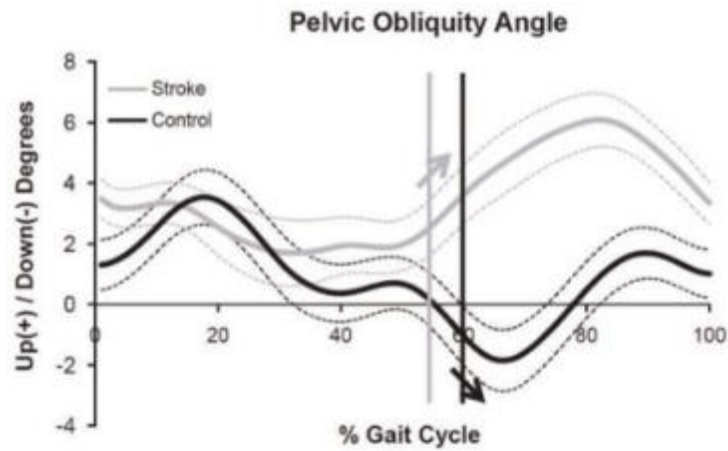


Figura 2.8: Oblicuidad Pélvica en Sujetos Sanos y Con Discapacidad [15]

2.1.4 LOPES (Lower-extremity Powered ExoSkeleton)

LOPES es un proyecto de desarrollo de un dispositivo robótico para la rehabilitación de la marcha y evaluación de la función motora en sobrevivientes de accidentes cerebrovasculares. Esto implica el diseño de la configuración mecánica del exoesqueleto, así como la estructura de control. El proyecto dio inicio en el año 2001 en la University of Twente ubicada en la ciudad de Enschede (Países Bajos) [18].

En la Figura 2.9 es posible observar el primer prototipo funcional del exoesqueleto LOPES.

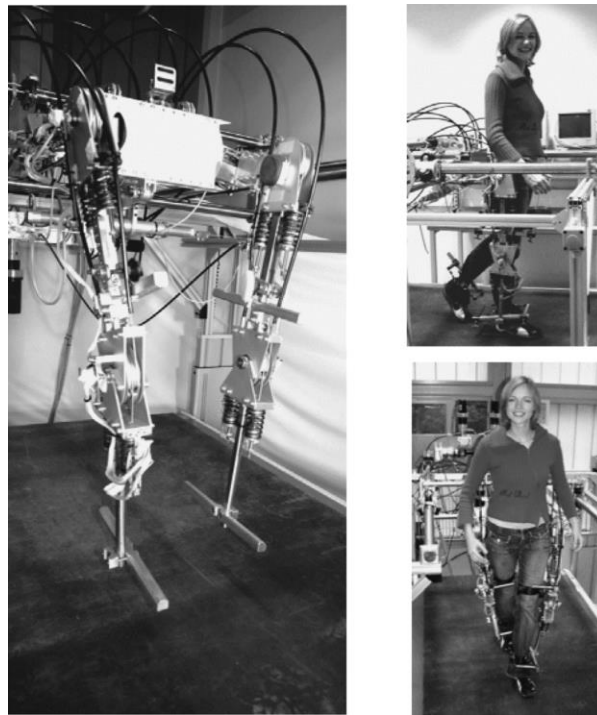


Figura 2.9: Prototipo LOPES [19]

A continuación se relacionan las principales características del proyecto:

- ❖ Diseño y construcción de un dispositivo robótico que permitiera una marcha muy cercana a la normal, permitiendo ser seguro para el paciente y para el fisioterapeuta. Para cumplir con estos requerimientos, el dispositivo debe permitir un modo llamado “patient-in-charge” (paciente en carga), donde un paciente sano debería poder caminar con el dispositivo sin sentirse obstaculizados. Un modo “robot-in-charge” (robot en carga) donde el dispositivo es capaz de mover un paciente pasivo generando un movimiento muy similar a una marcha normal, y un modo “therapist-in-charge” (terapeuta en carga) donde cualquier intervención que requiera hacer el terapeuta pueda ser programada [19].
- ❖ Un exoesqueleto con 3 articulaciones rotacionales por pierna: dos en la cadera y uno en la rodilla. Las cuales son accionados por actuadores elásticos, como se ve en la Figura 2.10 [19].

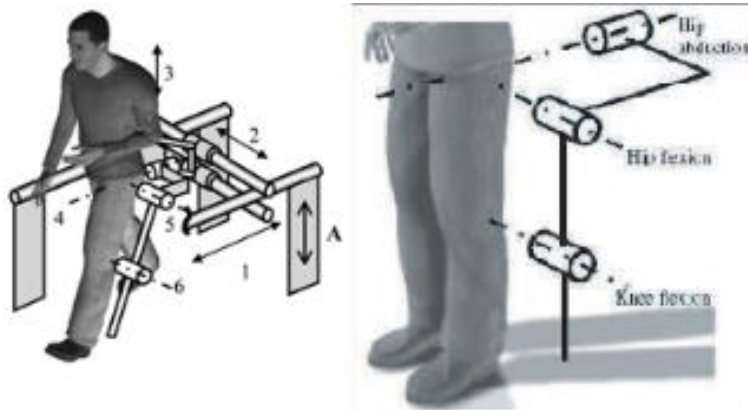


Figura 2.10: Actuadores LOPES [19] [20]

- ❖ La construcción del exoesqueleto comprende la utilización de una banda caminadora que permite una marcha más fluida, sin forzar al paciente a un gran esfuerzo al caminar usando el exoesqueleto [19].

Actualmente el proyecto ha tenido múltiples mejoras, entre ellas la adición de actuadores para articulaciones del tobillo, además de su presentación visual, tal como se puede observar en la Figura 2.11 [21].



Figura 2.11: LOPES nueva versión [21]

Para llevar a cabo el control de las trayectorias y la simulación de la marcha del paciente se implementó una solución basada en Simulink/Mathlab, instalada en un sistema xPC Target embebido, la cual es una solución para la evaluación de prototipos, test de modelos y evaluación de soluciones hardware en tiempo real [21].

2.1.5 Análisis Comparativo

En la Tabla 2.1 se hace una comparación del software que implementa cada uno de los dispositivos analizados en el estado del arte, con el fin de tener una visión global sobre las principales características funcionales en cada uno de ellos.

Tabla 2.1: Análisis comparativo software de dispositivos para rehabilitación de la marcha

Dispositivo	Lokomat	Haptic Walker	RGR Trainer	Lopes
Característica Software				
Gráficas	SI	SI	SI	SI
Realidad Virtual	SI	NO	NO	NO
Datos de la marcha	SI	SI	SI	SI
Datos del dispositivo	SI	SI	SI	SI
Lenguaje de programación	C, Simulink, Ogre3D	C, C++	Labview	MATLAB/Simulink
HMI	SI	SI	SI	SI
GUI	SI	SI	SI	SI
Uso de BD	SI	Información No Disponible	Información No Disponible	Información No Disponible
Hoja Clínica	Información No Disponible	Información No Disponible	Información No Disponible	Información No Disponible
Reportes	SI	Información No Disponible	Información No Disponible	Información No Disponible

Para los dispositivos analizados en este documento, se destaca en cada uno de ellos la capacidad del software para presentar la información capturada en tiempo real, lenguajes de programación utilizados, generación de reportes, caracterización y seguimiento del paciente, entre otras. A continuación se explica brevemente cada uno de las características evaluadas, sin embargo para algunas de ellas marcadas con la etiqueta “Información No Disponible”, no fue posible encontrar información disponible, dado que los datos específicos no han sido publicados por los autores.

- Gráficas: se evalúa la capacidad del software para representar la información capturada del dispositivo en diferentes tipos de gráficas en 2 o 3 dimensiones.
- Realidad virtual: se analiza la capacidad de las soluciones para involucrar al paciente durante la marcha en escenarios de realidad virtual.
- Datos de la marcha: se evalúa al software respecto a la presentación de datos espacio-temporales y cinemáticos capturados desde el exoesqueleto.
- Datos del dispositivo: Se valora la captura de datos relacionados al funcionamiento del dispositivo robótico.
- Lenguaje de programación: se relacionan los lenguajes y o sistemas usados para el control del dispositivo y presentación de la información capturada.
- HMI: se evalúa la utilización de una interfaz hombre-máquina (HMI).
- GUI: se analiza la implementación de una interfaz gráfica de usuario (GUI) para la visualización de la información adquirida del exoesqueleto.
- Uso de BD: se valora la utilización de algún mecanismo de almacenamiento de la información adquirida para su posterior consulta.
- Hoja Clínica: se evalúa la implementación de funcionalidades orientadas al registro, y caracterización del paciente previamente a la sesión de rehabilitación.
- Reportes: se analizan las opciones de generación de reportes a partir de la información capturada durante las sesiones de rehabilitación de la marcha de los pacientes.

Como se pudo observar en la comparación realizada en la Tabla 2.1, en la mayoría de los proyectos no fue posible encontrar información respecto al almacenamiento de datos, generación de reportes y una funcionalidad para la caracterización del paciente. La generalidad de los documentos asociados a cada proyecto es la de relacionar la información

correspondiente a la instrumentación y de cómo se solucionaron ciertos problemas asociados a la misma.

Con el análisis de la Tabla 2.1 se puede evidenciar la importancia de agregar al software del exoesqueleto RUVEM, características como gráficas, datos de la marcha, datos del dispositivo, una GUI, y adicionalmente componentes que no se evidenciaron en el software de los dispositivos revisados, tales como un módulo de hoja clínica que permita caracterizar al paciente, y un módulo de reportes.

2.2 Marco Teórico y Conceptual

2.2.1 Fisiología Articular de Miembros Inferiores

En el contexto a trabajar es importante conocer el significado de la información generada por el exoesqueleto RUVEM, dado que existe la posibilidad de realizar algún tipo de cálculo y/o conversión de datos que permitan la comprensión de la información presentada por el software al profesional de la salud.

A continuación se hace una breve introducción a la información más relevante de las articulaciones de miembros inferiores, que serán objeto de medición a través del exoesqueleto.

Cadera: La cadera es la articulación raíz del miembro inferior que asume el soporte del tronco tanto en posición estática como durante la locomoción. Esta articulación proximal del miembro inferior, tiene como función orientarlo en todas las direcciones del espacio, para lo cual posee tres ejes y tres grados de libertad, un eje transversal (XOX) situado en el plano frontal, alrededor del cual se ejecutan los movimientos de flexo-extensión, un eje sagital (YOY) situado en el plano anteroposterior, que pasa por el centro (O) de la articulación, y alrededor de este se ejecutan los movimientos de abducción-aducción, y un eje vertical (OZ) que se confunde con el eje longitudinal (OR) del miembro inferior cuando la cadera está en posición de alineamiento, este eje permite los movimientos de rotación externa y rotación interna. A continuación se relacionan los movimientos relacionados a la cadera [17].

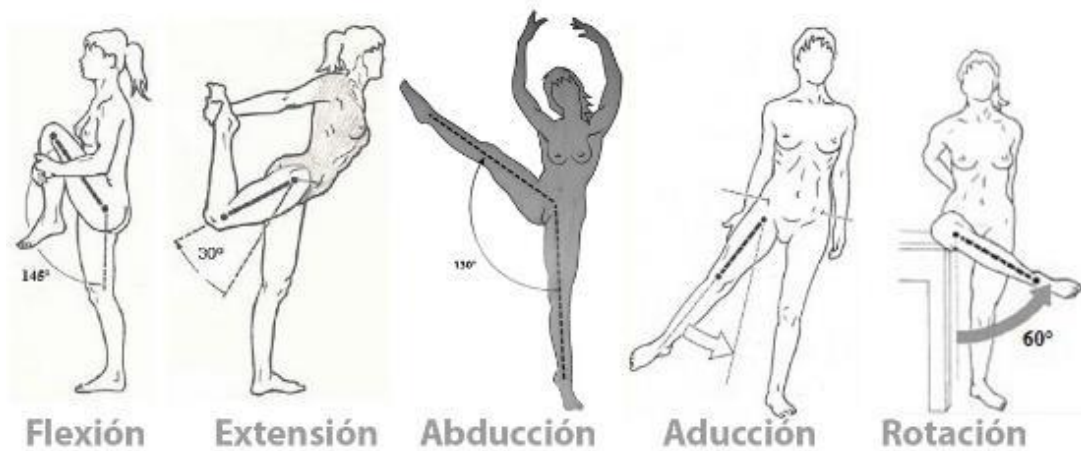


Figura 2.12: Movimientos Cadera [17]

- La *Flexión* es el movimiento que produce el contacto de la cara anterior del muslo con el tronco, de forma que el muslo y el resto del miembro inferior sobrepasan el plano frontal de la articulación, quedando por delante del mismo. Este movimiento puede alcanzar un ángulo de 145° con la rodilla flexionada y llevándola hacia el tórax como se muestra en la Figura 2.12 [17].
- La *Extensión* dirige el miembro inferior por detrás del plano frontal, este movimiento alcanza un ángulo de 30° cuando la mano homolateral desplaza el miembro inferior hacia arriba y atrás como se muestra en la Figura 2.12 [17].
- La *Abducción* dirige el miembro inferior hacia afuera y lo aleja del plano de simetría del cuerpo. Este movimiento alcanza un ángulo de 130° como se muestra en la Figura 2.12 [17].
- La *Aducción* es el movimiento que lleva el miembro inferior hacia adentro y lo aproxima al plano de simetría del cuerpo, en este se alcanza una amplitud de 30° como se muestra en la Figura 2.12 [17].
- La *Rotación Longitudinal* se realiza alrededor del eje mecánico del miembro inferior, siendo la rotación interna el movimiento de llevar la punta del pie hacia adentro y la rotación externa hacia afuera, es posible alcanzar un ángulo de 60° . Tal como se muestra en la Figura 2.12 [17].

Rodilla: es la articulación intermedia del miembro inferior, principalmente es una articulación de un solo grado de libertad, la flexoextensión, que le permite aproximar o alejar, en mayor o menor medida el extremo del miembro de su raíz, también puede decirse que es la regulación de la distancia del cuerpo con respecto al suelo. A continuación se relacionan los movimientos asociados a la rodilla [17].



La *Flexoextensión* es el movimiento principal de la rodilla, y se divide en extensión, que se define como el movimiento que aleja la cara posterior de la pierna de la cara posterior del muslo, este puede alcanzar un ángulo de 10° , y la flexión que es el movimiento que aproxima la cara posterior de la pierna a la cara posterior del muslo, alcanzando un ángulo de amplitud hasta de 160° como se muestra en la Figura 2.13 [17].

Figura 2.13: Rodilla - Movimiento de Flexión [17]

Tobillo: es la articulación distal del miembro inferior, se dice que es una tróclea por poseer un único grado de libertad, esta articulación condiciona los movimientos de la pierna respecto al pie en el plano sagital, no solo es necesaria si no indispensable para la marcha. Al igual que la rodilla el movimiento principal es la flexoextensión, la cual se detalla a continuación [17].



La *Flexión* es el movimiento que aproxima el dorso del pie a la cara anterior de la pierna, alcanzando un ángulo hasta de 30° , y la extensión por el contrario aleja el dorso del pie de la cara anterior de la pierna, alcanzando un ángulo hasta de 50° . En la Figura 2.14. Es posible observar la orientación de los movimientos de flexión y extensión, donde el punto A indica la posición de referencia y desde allí el desplazamiento hacia el punto B indica Flexión y del punto A hacia C indica Extensión [17].

Figura 2.14: Tobillo - Movimiento de Flexoextensión [17]

Adicionalmente a la medición de los ángulos de cadera, rodilla y tobillo, se llevará a cabo la medición del ángulo de inclinación del cuerpo, presión en la zona plantar y electrogénesis de diferentes músculos.

2.2.2 Estándares HL7 (Health Level Seven)



HL7 International (Health Level Seven) es una “Organización de Desarrollo de Estándares” (SDOs), para el ámbito de la salud. Fundada en 1987 sin fines de lucro está acreditada por ANSI desde 1994. Opera a nivel internacional y su misión es proveer estándares globales para los dominios: clínico, asistencial, administrativo y logístico, con el fin de lograr una interoperabilidad real entre los distintos sistemas de información en el área de la salud. Dentro de los más de 2300 miembros de HL7, se incluyen aproximadamente 500 miembros corporativos, quienes representan más del 90% de proveedores de sistemas de información para el campo de la salud [13].

```

<Patient xmlns="http://hl7.org/fhir">
  <id value="example"/>
  <text>
    <status value="generated"/>
    <div xmlns="http://www.w3.org/1999/xhtml">
      <table>
        <tbody>
          <tr>
            <td> Name</td>
            <td> Peter James
              <b> Chalmers</b>  (&quot;Jim&quot;;)
            </td>
          </tr>
          <tr>
            <td> Address</td>
            <td> 534 Erewhon, Pleasantville, Vic, 3999</td>
          </tr>
          <tr>
            <td> Contacts</td>
            <td> Home: unknown. Work: (03) 5555 6473</td>
          </tr>
          <tr>
            <td> Id</td>
            <td> MRN: 12345 (Acme Healthcare)</td>
          </tr>
        </tbody>
      </table>
    </div>
  </text>
  <!-- MRN assigned by ACME healthcare on 6-May 2001 -->
  <identifier>
    <use value="usual"/>
  </identifier>
</Patient>

```

Figura 2.15: Mensaje XML con la información del paciente [23]

Para el intercambio de información se utilizan los formatos XML o JSON, cumpliendo con el Estándar HL7 FHIR [23]. En la Figura 2.15 se presenta un ejemplo de cómo representar los datos de un paciente a través de un mensaje en formato XML utilizando el estándar HL7 FHIR.

2.2.3 Arquitecturas de Software

Una de las definiciones más conocidas de arquitectura de software (AS), es la de Paul Clements, quien dice que a grandes rasgos, es una vista del sistema que incluye los componentes principales del mismo, la conducta de esos componentes según se la percibe desde el resto del sistema y las formas en que los componentes interactúan y se coordinan para alcanzar la misión del sistema [9].

Los estilos arquitecturales son una herramienta básica para un arquitecto de software a la hora de diseñar la arquitectura de una aplicación. Normalmente en una arquitectura no se debe basar en un solo estilo arquitectural, si no hacer una combinación de varios estilos obteniendo las ventajas de cada uno de ellos [10].

A continuación se presentan algunos de los principales estilos arquitecturales:

Arquitectura Cliente/Servidor

Define una relación entre dos aplicaciones en las cuales una de ellas (cliente) envía peticiones a la otra (servidor).

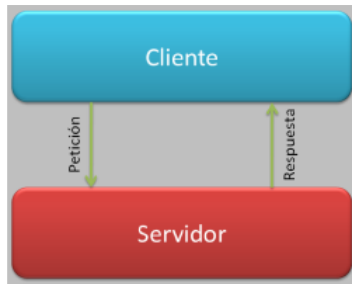


Figura 2.16 Arquitectura Cliente/Servidor

Es un sistema para sistemas distribuidos, en el cual se divide el sistema en una aplicación cliente, una aplicación servidora y una red a través de la cual se conectan.

El uso de este estilo en el presente trabajo, se da debido a que el problema a solucionar implica diferentes dispositivos conectados a través de una red LAN [10].

Arquitectura en Capas (N-Layer)

Este estilo se basa en una distribución jerárquica de los roles y las responsabilidades para proporcionar una división efectiva de los problemas a resolver. Estos roles indican la responsabilidad y funcionalidad de cada capa, al igual que la interacción que tienen con otras capas.



Figura 2.17 Arquitectura N-Layer

Este estilo de arquitectura aporta beneficios importantes tanto al proceso de desarrollo como a la aplicación en sí, puesto que permite la creación de aplicaciones con un alto nivel de escalabilidad, rendimiento, testeabilidad y se hace más fácil de entender sus componentes debido a que están lógicamente en capas diferentes [10].

Arquitectura Orientada a Objetos

Se define el sistema como un conjunto de objetos que cooperan entre sí, diferente a tener solo un conjunto de procedimientos. Se aplican conceptos como alta cohesión, bajo acoplamiento, comunicación a través de mensajes.



Figura 2.18 Arquitectura OO

Dentro de los beneficios encontramos que es muy fácil de entender, debido a que el diseño orientado a objetos define una serie de componentes que son muy cercanos a los objetos del mundo real, permite la creación de componentes reusables debido a la propiedad que tienen los objetos de ser polimorfos, facilita la aplicación de diferentes tipos de pruebas gracias al encapsulamiento que facilita el trabajo, entre otras [10].

En el actual proyecto se pretende implementar la Arquitectura en Capas, principalmente por los beneficios que aporta al proceso de desarrollo de software y a la aplicación. Para esta implementación se desarrollará 3 capas principalmente, que incluyen Interfaz Gráfica de Usuario, Lógica de Negocio y capa de Acceso a Datos, además se desarrollarán otras capas que son transversales a las capas anteriores, y que su finalidad es apoyar el buen funcionamiento de todo el sistema, entre estas se encuentran las capas de Seguridad, Entidades, Excepciones, Utilidades, entre otras.

2.2.4 Java SE



Figura 2.19 Logo Java

La plataforma Java en su Edición Estándar (Java SE), permite desarrollar y desplegar aplicaciones Java en computadores de escritorio y servidores, también en sistemas embebidos que son ya muy comunes. Java ofrece interfaces de usuario enriquecidas, rendimiento, versatilidad, portabilidad y la seguridad que las aplicaciones de hoy en día requieren [8].

Java es la plataforma de aplicaciones más popular del planeta y cuenta con una comunidad de desarrolladores muy activa, impulsados por herramientas eficaces, libros, bibliotecas, muestras de código y mucho más.

Algunos de los principales motivos por los cuales se elige este lenguaje, es que permite el desarrollo de software libre, es muy robusto para el desarrollo de aplicaciones de escritorio, que es el tipo de aplicación a desarrollar en este proyecto, tiene una comunidad amplia y activa de desarrolladores, es posible encontrar suficiente información y de libre acceso en la Web, hay muchas herramientas y plugins libres para el desarrollo de software bajo este lenguaje.

2.2.5 PostgreSQL



Figura 2.20 Logo PostgreSQL

PostgreSQL es un potente, sistema manejador de base de datos objeto-relacional. Cuenta con más de 15 años de desarrollo activo y una arquitectura probada que se ha ganado una sólida reputación de estabilidad, potencia, robustez, facilidad de administración e implementación de estándares.

Se ejecuta en los principales sistemas operativos, incluyendo Linux, UNIX (AIX, BSD, HP-UX, SGI IRIX, Mac OS X, Solaris, Tru64) y Windows. Es totalmente compatible con ACID (Atomicity, Consistency, Isolation and Durability), tiene soporte completo para llaves foráneas, uniones, vistas, disparadores y procedimientos almacenados (en lenguajes como PL/pgSQL, PL/Perl, PL/Python y PL/Tcl).

Implementa la mayoría de tipos de datos SQL: 2008, incluyendo INTEGER, NUMERIC, BOOLEAN, CHAR, VARCHAR, DATE, INTERVAL, y TIMESTAMP. También soporta almacenamiento de objetos binarios grandes, como imágenes, sonidos o vídeo. Cuenta con

interfaces nativas de programación para C / C + +, Java, Net, Perl, Python, Ruby, Tcl, ODBC, entre otros, y la documentación excepcional.

El código fuente de PostgreSQL se encuentra disponible bajo la licencia de código abierto PostgreSQL License, que permite su uso, modificación y distribución de manera libre [7].

Se elige PostgreSQL como manejador de base de datos, debido a su licencia de software libre que permite su uso y distribución, además de ser un software robusto y fácil de usar, que cuenta con gran cantidad de documentación en la Web y una comunidad activa de usuarios.

2.2.6 Protocolo TCP/IP

TCP/IP es un conjunto de protocolos, en el cual TCP es un protocolo de transporte de datos orientado por conexión, que envía datos como un flujo de bytes sin estructura. TCP envía paquetes de datos a un nodo destino, y en caso de presentarse una pérdida de paquetes, es capaz de retransmitirlos hasta que se cumpla una condición de tiempo o hasta que se haya hecho la entrega exitosa. También puede reconocer mensajes duplicados y los descarta adecuadamente [24].

Teniendo en cuenta que el protocolo TCP/IP es robusto en la transmisión de información, al retransmitir en caso de pérdida de paquetes y descartarlos en caso de llegar repetidos, será el protocolo a utilizar entre el software a desarrollar y el exoesqueleto RUVEM. Es importante que la comunicación a través de la red LAN se lleve a cabo sin pérdida de información, puesto que se requiere la mayor confiabilidad en los datos enviados y recibidos del exoesqueleto.

2.2.7 LabVIEW y Single-Board RIO

National Instruments (NI) es una empresa estadounidense dedicada al desarrollo y venta de productos de software, hardware y servicios. Esta empresa es la desarrolladora del software LabVIEW, el cual es un software de ingeniería de sistemas que requiere pruebas, medidas y control con acceso rápido hardware e información de datos. Este software permite simplificar la integración de hardware de NI u otros fabricantes, usando una sintaxis de programación gráfica que reduce el tiempo de desarrollo [25].

La Single-Board RIO (sbRIO) es una tarjeta/placa computadora de tamaño pequeño pero muy robusta en el procesamiento en tiempo real, lo que la hace ideal para proyectos como la creación de un exoesqueleto, debido a que integra varios componentes de hardware que se comunican a través de puestos de Entrada y Salida (E/S), requiriendo una comunicación muy veloz para dar respuesta a los cambios del entorno en una eventual marcha de un paciente con el exoesqueleto [26].

Se hace la revisión de estas dos tecnologías de la empresa National Instruments, teniendo en cuenta que hacen parte de la instrumentación del exoesqueleto RUVEM, y que LabVIEW es el software que permitirá la comunicación entre el software a desarrollar en el actual proyecto y el exoesqueleto, por lo tanto se hace importante tener una descripción de lo que son estas tecnologías.

2.2.8 NetBeans IDE



Figura 2.21 Logo NetBeans

NetBeans IDE es un entorno de desarrollo integrado de código abierto para desarrolladores de software. Ofrece todas las herramientas necesarias para crear aplicaciones profesionales de escritorio, empresariales, web y aplicaciones móviles con la plataforma Java, así como C / C + +, PHP, JavaScript, Groovy y Ruby.

Está desarrollado en el lenguaje Java y se encuentra disponible para los sistemas operativos Linux, Windows, Solaris, Mac OS X.

Al ser de código abierto este proyecto cuenta con apoyo de una gran comunidad de desarrolladores y además se puede encontrar en la web de forma gratuita muchos recursos como documentación, foros de ayuda, plugins entre otros [11].

Se elige el IDE NetBeans principalmente por su facilidad de uso, el acceso libre a la herramienta, y la facilidad para trabajar bajo el lenguaje Java.

2.2.9 Marcos de Trabajo Ágil - Scrum



Figura 2.22 Logo Scrum

Scrum es un enfoque ágil para el desarrollo de software. No es un proceso completo o una metodología, sino un marco de trabajo. En lugar de proporcionar una descripción completa y detallada de cómo deben realizarse las tareas de un proyecto, deja mucho en manos del equipo de desarrollo. Esto ocurre debido a que es el equipo quien conocerá la mejor manera de resolver las problemáticas que se presenten [12].

El equipo de desarrollo se encuentra apoyado en dos roles: el ScrumMaster y el Product Owner. El ScrumMaster es quien vela por la productividad del equipo de desarrollo. Puede ser considerado un coach o líder servil/facilitador encargado de acompañar al equipo de desarrollo de forma tal que encuentre su punto de mayor eficiencia. El Product Owner es quien representa al negocio, stakeholders, cliente y usuarios finales. Tiene la responsabilidad de conducir al equipo de desarrollo hacia el producto adecuado [12].

El progreso de los proyectos que utilizan Scrum se realiza y verifica en una serie de iteraciones llamadas Sprints. Estos Sprints tienen una duración fija, pre-establecida de 1 a 4 semanas. Al

comienzo de cada Sprint el equipo de desarrollo realiza un compromiso de entrega de una serie de funcionalidades o características del producto en cuestión [12].

Scrum se considera “una manera simple de manejar problemas complejos”. Se sostiene firmemente en principios sólidos y largamente respetados, incluyendo el empirismo, los elementos emergentes y la auto-organización [12].

- *Empirismo*: Se refiere al proceso continuo de inspección y adaptación que permite tomar decisiones en tiempo real y en base a datos reales [12].
- *Elementos emergentes*: Son consecuencia de una aproximación empírica. Implica que todas las soluciones a todos los problemas emergerán y se volverán visibles a medida que avancemos en los proyectos.

Cuando se permite que las soluciones emerjan se está frente a la solución más simple y apropiada para el contexto actual. Este surgimiento, junto con el empirismo, llevarán a la solución más apropiada y flexible (es decir que podremos cambiar) [12].

- *Auto-organización*: Se refiere a la estructura de los equipos que crean el producto. Se otorga autonomía a pequeños equipos multidisciplinarios para que puedan tomar decisiones importantes, necesarias para 1) crear un producto de alta calidad y 2) manejar su propio proceso. La razón de este enfoque se fundamenta en que aquellos que hacen el trabajo son quienes mejor conocen cómo hacerlo. La auto-organización funciona cuando hay objetivos y límites claros [12].

Este marco de trabajo no prescribe la entrega de documentación específica como sucede en metodologías tradicionales como RUP, por lo tanto es el equipo del proyecto, conocido como Scrum Team, el que define cuáles serán los documentos más importantes para generar durante la ejecución. Para este proyecto el equipo de trabajo definió como parte de la documentación, los diagramas de clases, diagramas de paquetes, modelo entidad relación, casos de uso, diagramas de proceso, diagrama de estilo arquitectural, diagrama de componentes, diagrama de despliegue, manual de usuario y casos de prueba.

Se elige la metodología Scrum, debido a que sus principales ventajas incluyen, la adaptación al cambio, permitiendo frecuentes cambios en los requisitos del proyecto, permite al equipo trabajar de manera integrada con el usuario y/o cliente, además se adapta muy bien a equipos conformados por menos de 9 personas.

2.2.10 Visualización de Datos

La visualización de datos (data visualization, en inglés) es un término que generalmente cubre tanto la visualización de información como la científica. Este concepto es una manera general

de hablar de cualquier cosa que convierte las fuentes de datos en una representación visual (como gráficos, mapas, a veces incluso sólo las tablas). En la Visualización de Datos cuando las variables se eligen cuidadosamente, pueden mostrar valores atípicos, regiones densas, bimodalidades, etc. En los campos donde los datos son visuales (por ejemplo, campos médicos), el análisis visual puede ser realmente el principal medio de análisis de datos [27].

Para el presente trabajo es importante hacer un análisis de las variables involucradas en la solución del problema, y de esta manera proponer a los fisioterapeutas, quienes aprueban los componentes de visualización de los datos, diferentes opciones de mecanismos para la visualización de los datos generados por el exoesqueleto durante las sesiones de marcha con pacientes.

2.3 Observaciones Finales

Como resultado de la revisión del estado del arte de las aplicaciones software para exoesqueletos de marcha asistida, se observó que para los proyectos analizados se construyó un software a la medida dado que se ajusta a la instrumentación del exoesqueleto, concluyendo que el desarrollo de un software a la medida es la mejor opción que satisface las necesidades del equipo médico y del equipo de ingenieros a cargo de la construcción del exoesqueleto.

Por otro lado el análisis del marco teórico y conceptual permitió optar por el desarrollo de una aplicación de escritorio, haciendo uso de herramientas de software no privativo basadas en la plataforma Java, esto debido a que se evidenció ser un lenguaje de programación robusto para el desarrollo de aplicaciones de escritorio, el tipo de aplicación más conveniente en este caso, por requerirse la presentación de información a través de gráficos en tiempo real, transferencia de información a través de sockets y suficiente capacidad de cómputo para el procesamiento de los datos adquiridos del exoesqueleto, además, Java cuenta con una comunidad amplia y activa de desarrolladores y es posible encontrar suficiente información y de libre acceso en la Web.

Dentro del desarrollo a realizar es importante documentar lo necesario para que el software sea comprendido, y así mismo cumplir con la transferencia del conocimiento requerido cuando se necesite ampliar sus funcionalidades, por esta razón dentro de la información a generarse están los diagramas de clases, diagramas de paquetes, modelo entidad relación, casos de uso, diagramas de proceso, diagrama de estilo arquitectural, diagrama de componentes, diagrama de despliegue, casos de prueba, manual de usuario, entre otros, logrando de esta manera describir el sistema principalmente desde los puntos de vista lógico, desarrollo, proceso y físico.



Capítulo 3 DISEÑO DEL SISTEMA

En el presente capítulo se hará una descripción del sistema a través de los requerimientos que dieron lugar al desarrollo del sistema, los diferentes diagramas que componen las vistas de la arquitectura del software, además se presentan detalles técnicos de la implementación, y una descripción de las funcionalidades usando la interfaz gráfica para detallar cada una de ellas.

3.1 Análisis y Especificación de Requerimientos

El proceso de análisis y especificación de requerimientos fue guiado por el marco de trabajo ágil Scrum, inicialmente el usuario definió en 3 historias de usuario épicas⁴ sobre lo que debía ser el sistema. Tomando estas historias como punto de partida, se elaboraron bosquejos iniciales de la interfaz gráfica de usuario, y a partir de allí se inició el desarrollo de la aplicación en sprints⁵ de 2 semanas, en los cuales se hacían revisiones y ajustes sobre el prototipo que fue tomando forma de manera evolutiva, trabajando de la mano con el usuario, hasta llegar a la versión que se presenta en el actual documento. Como resultado de la desagregación de las historias de usuario durante la ejecución del proyecto, se dio lugar a la creación de 29 funcionalidades agrupadas en 4 módulos, las cuales pueden ser consultadas en la Sección 7. Matriz de Descomposición Funcional del documento de Plan de Pruebas que se relaciona en el Anexo C.

3.1.1 Requerimientos

Como requisitos iniciales para el desarrollo de la aplicación, los usuarios hicieron la entrega de un documento con tres historias de usuario épicas, que fueron la base para iniciar el proceso de desarrollo del software, guiados por el marco de trabajo ágil Scrum. A continuación en las Tabla 3.1, Tabla 3.2 y Tabla 3.3 se relacionan las historias de usuario antes mencionadas.

Tabla 3.1 Historia de Usuario del Módulo de la Hoja Clínica

Código	HU-001
Nombre	Módulo de Hoja Clínica
Descripción	Yo como Fisioterapeuta, quiero poder de manera amigable capturar los datos que caracterizan al paciente, lesiones que padece y parámetros que

⁴ Historias de usuario muy grandes que difícilmente se puede medir el esfuerzo requerido para su desarrollo

⁵ Sprint es la unidad básica de trabajo para un equipo Scrum, durante el cual se crea un incremento de producto "Hecho o Terminado" utilizable, potencialmente entregable.

	establecen el control de la marcha, para tener un registro previo a las sesiones de marcha con el exoesqueleto.
Detalles	Datos del Paciente: Documento de identidad, Tipo: T.I., C.C., C.E., Número, Apellidos, Nombre, Fecha de nacimiento, Edad, Género, Estatura, Peso. Lesiones • Tipo de lesión: ✓ Lesión medular – Nivel de lesión (cervical, dorsal, lumbar, sacro) ✓ Clasificación ASIA (A, B, C, D, E) ✓ TEC – Clasificación (leve – moderado – severo) ✓ ECV – Clasificación (hemorrágica, isquémica) ✓ Tumores – localización ✓ Osteomusculares – Ubicación • Fecha de la lesión • Datos de la evaluación: Ver Archivos de evaluación de movilidad articular. • Limitaciones en la movilidad articular ✓ Localización ✓ Rango ✓ Observaciones • Alteraciones en la sensibilidad ✓ Localización ✓ Tipo de alteración (ausente – disminuida – aumentada) • Debilidad muscular ✓ Localización ✓ Observaciones

Tabla 3.2 Historia de Usuario del Módulo de Instrumentación

Código	HU-002
Nombre	Módulo de Instrumentación
Descripción	Yo como Fisioterapeuta quiero un módulo de comunicación con el Exoesqueleto, que permita el envío de los parámetros de comunicación a través del protocolo TCP/IP, y reciba los datos generados por el dispositivo a través de UDP, para tener un control del exoesqueleto y poder capturar la información que este genera.
Detalles	Envío de datos: Para la comunicación con el exoesqueleto, en cuanto al envío de parámetros de configuración, deberá diseñarse una interfaz gráfica de usuario, que sea de fácil uso para los expertos fisioterapeutas, usando gráficos que permitan identificar claramente la información enviada al exoesqueleto. Recepción de datos: Los datos recibidos por el exoesqueleto deberán almacenarse en una base de datos relacional, debidamente normalizada, que estructure de manera lógica la información capturada y permita su correcto almacenamiento y recuperación.

	Presentación de datos: Deberá diseñarse una interfaz gráfica para el despliegue de la información recibida del exoesqueleto, en la cual se presentan los datos mediante gráficos lineales, de barras, histogramas o cualquier tipo de gráfico que permita la comprensión del conjunto de datos presentados. Control de Marcha: ➤ Porcentaje de asistencia: 0 Activa, 25 – 75 Asistida, 100 Pasiva. ➤ Actividad a programar depende de los parámetros temporales y espaciales de la marcha, los parámetros temporales son: ✓ Ciclo de marcha: lapso en el que transcurren dos eventos idénticos con el mismo pie (de contacto inicial a contacto inicial del mismo pie) ✓ Tiempo de paso: Intervalo de tiempo entre el contacto inicial de un pie y el mismo evento del pie contrario ✓ Tiempo de balanceo ✓ Frecuencia o cadencia: Numero de pasos por minuto ✓ Velocidad ✓ Aceleración lineal ➤ Parámetros espaciales de la marcha: ✓ Longitud de la zancada: distancia lineal en metros entre 2 eventos iguales y sucesivos de la misma extremidad ✓ Longitud de paso: distancia entre el contacto inicial de los 2 pies ✓ Ancho de paso ✓ Angulo de paso ➤ Señales EMG: ✓ Se requiere que se seleccionen posiciones específicas de los electrodos sobre un mímico de los miembros inferiores. ➤ Supervisión de la marcha ✓ Al supervisar los AMA (Arcos de Movilidad Articular) se recomienda entregar la información al usuario conforme a las convenciones clínicas establecidas. ✓ Por cada articulación (Cadera, rodilla o tobillo) son dos movimientos los que deben ser medidos en el plano sagital: Para la cadera y rodilla, Flexión y extensión, y para el tobillo, Dorsi-flexion y planti-flexion.
--	--

Tabla 3.3 Historia de Usuario del Módulo de Reportes

Código	HU-003
Nombre	Módulo de Reportes
Descripción	Yo como Fisioterapeuta quiero poder configurar los reportes a generar, siendo de manera dinámica la recuperación de la información, generando reportes en formatos como PDF, CSV, TXT, entre otros, para recuperar la información

	generada por el exoesqueleto en las sesiones de marcha y visualizarla en diferentes tipos de gráficas.
Detalles	Deberá permitir la generación de información de manera detallada por cliente, o usando funciones de agregación como suma, cantidad, promedio, máximo, mínimo, entre otros.

3.1.2 Prototipos y/o Bosquejos

En la primera iteración del desarrollo del software, se realizaron algunos bosquejos sobre los cuales los usuarios hicieron correcciones y comentarios para dar inicio a la construcción del primer prototipo del software, y de esta manera continuar un proceso de desarrollo evolutivo. A continuación se relacionan los bosquejos iniciales que se construyeron basados en las historias de usuario que se relacionan la sección 3.1.1.

Administración de Paciente

Tipo de documento:

Número documento:

Apellidos:

Nombre:

Fecha nacimiento:

Edad:

Género: ☒ M ☒ F

Estatura:

Peso:

Long. Tibia:

Long. Fémur:

Botones:

Figura 3.1: Bosquejo Administración del Paciente

En la Figura 3.1 se presenta el bosquejo inicial de la interfaz gráfica de administración de pacientes, la cual debe permitir la búsqueda, creación, actualización y borrado de un paciente.

Tipo de Lesión

Medular

TEC

ECV

Tumor Localización

Osteomuscular Localización

Fecha de lesión

12 May 2016

Clasificación ASIA

A

Manifestación

Manifestación

Tipo tumor

Osteomuscular tipo

Observaciones

Nuevo

Guardar

Eliminar

Lesión	Fecha	Localización	Clasificación
Tumor	2015/01/20	Cuello	A
Medular	2014/10/11	Torácico	B

Figura 3.2: Bosquejo Administración del Paciente

La interfaz gráfica de administración de las lesiones del paciente se modeló en la Figura 3.2, como primera versión de esta funcionalidad.

Cuello

Flexión

Extensión

Rotación

Inclinación

Izq

Der

Tronco

Flexión

Extensión

Rotación

Inclinación

Izq

Der

Hombro

Flexión

Extensión

Rotación

Inclinación

Izq

Der

Cadera

Flexión

Extensión

Rotación

Inclinación

Izq

Der

Fecha de lesión

12 May 2016

Observaciones

Nuevo

Guardar

Eliminar

Fecha Registro	Observaciones
2015/01/20	Ninguna
2014/10/11	Ninguna

Figura 3.3: Bosquejo Evaluación de Movilidad Articular

47

La evaluación de la movilidad articular se basó en formatos impresos ya usados por los fisioterapeutas para la elaboración del primer bosquejo de esta funcionalidad, la cual se puede ver en la Figura 3.3.

Evaluación Alteraciones en la Sensibilidad

Light Touch

R

L

Pin Prick

R

L

C2

C3

C4

C5

C6

C7

C8

T1

T2

T3

T4

C8

T1

T2

T3

T4

Fecha de lesión

12 May 2016

Observaciones

Nuevo

Guardar

Eliminar

Fecha Registro	Observaciones
2015/01/20	Ninguna
2014/10/11	Ninguna

Figura 3.4: Bosquejo Evaluación de Alteraciones en la Sensibilidad

En la Figura 3.4 se presenta el bosquejo de la funcionalidad de evaluación de alteraciones en la sensibilidad, el cual se construyó basado en formatos impresos que usan los fisioterapeutas actualmente en la caracterización del paciente.

Evaluación Debilidad Muscular

Miembros Superiores

Tronco

Miembros Inferiores

Fecha de lesión

12 May 2016

Observaciones

Nuevo

Guardar

Eliminar

Fecha	Fecha	Creas
2015/01/20		
2014/10/11		

Figura 3.5: Bosquejo Evaluación de Debilidad Muscular

El bosquejo de la evaluación de debilidad muscular que se muestra en la Figura 3.5, es una interfaz gráfica sencilla en la cual el fisioterapeuta registra de manera libre la información que hace durante la inspección al paciente.

Control Exoesqueleto

Trayectorias

Longitud Fémur	Longitud Tibia	Longitud Paso	Velocidad Paso	Fecha
MEDIO	ALTO	BAJO	MEDIO	2015/01/20
ALTO	ALTO	MEDIO	BAJO	2014/10/11

Cantidad de ciclos

2

Enviar Trayectoria

Control Estados

Iniciar Marcha

Pausar Marcha

Continuar Marcha

Parar Marcha

Finalizar Marcha

Control Deltas

Delta Long. Paso

Delta Vel. Paso

Figura 3.6: Bosquejo Control Exoesqueleto

El control del exoesqueleto consta del envío de una trayectoria y el posterior control de los estados en los que puede estar el exoesqueleto, tal como se muestra en la Figura 3.6.

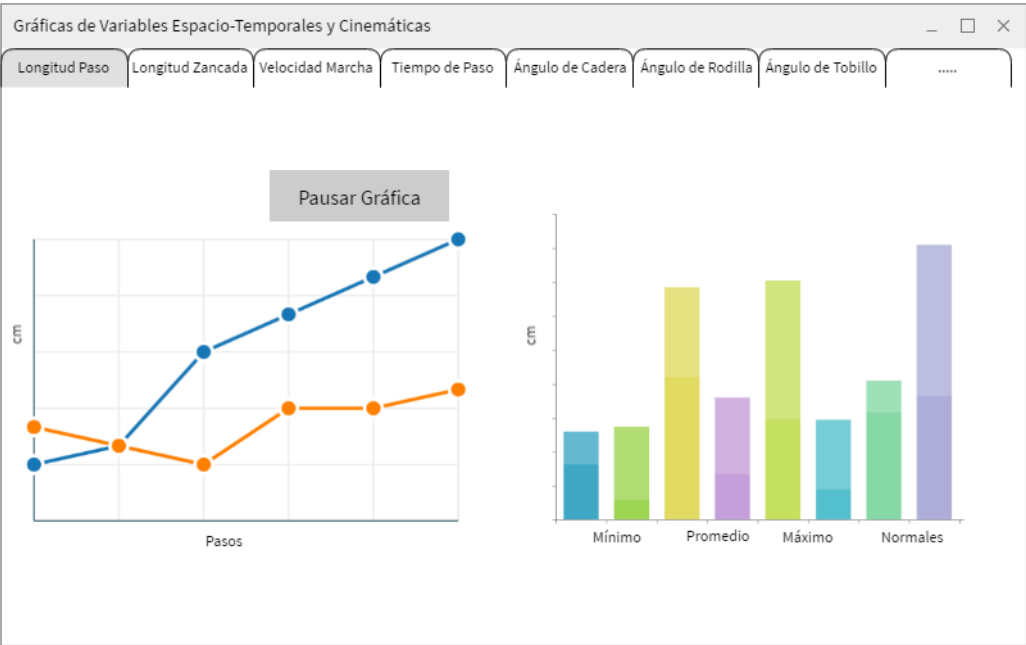


Figura 3.7: Bosquejo Presentación de Datos Obtenidos del Exoesqueleto

La presentación de los datos obtenidos del exoesqueleto se diseñó inicialmente en la interfaz gráfica que se muestra en la Figura 3.7.

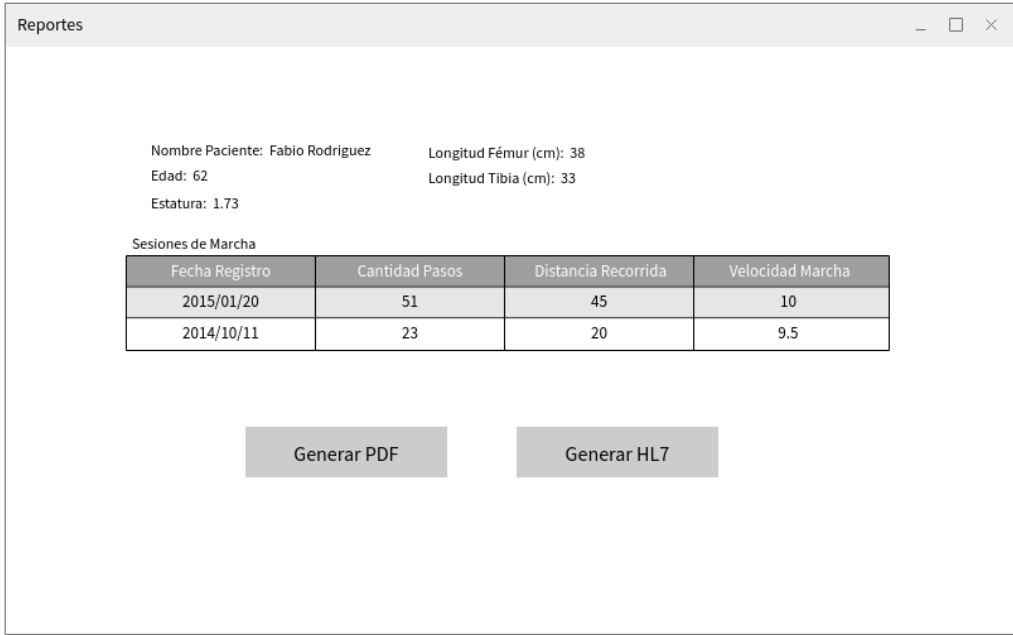


Figura 3.8: Bosquejo de Módulo de Reportes

El módulo de reportes se diseñó inicialmente en una interfaz gráfica muy sencilla, como se muestra en la Figura 3.8, la cual permite seleccionar una o más sesiones de marcha de un paciente y generar un reporte en formato PDF o HL7.

3.1.3 Resumen de Sprints

Durante la ejecución del proyectos se llevaron a cabo 67 sprints de 2 semanas, en cada uno de los cuales se priorizaron actividades de acuerdo al Backlog del proyecto, que consta de 3 historias de usuario épicas, las cuales se fueron desglosando en el transcurso del proyecto, revisando sobre el software funcional los ajustes requeridos. En la Tabla 3.4 se describe brevemente las fechas en las que se dieron cada uno de los sprints y las actividades que se llevaron a cabo en cada uno de ellos.

Tabla 3.4: Resumen de los Sprints ejecutados en el proyecto

HU-001	Módulo de Hoja Clínica
Sprint 01	Agosto 12 a Agosto 24 de 2013
Sprint Backlog	Planteamiento del problema
Sprint 02	Agosto 26 a Septiembre 6 de 2013
Sprint Backlog	- Estado del arte exoesqueletos - Análisis comparativo
Sprint 03	Septiembre 9 a Septiembre 20 de 2013
Sprint Backlog	- Marco teórico y conceptual - Evaluación de tecnologías a usar
Sprint 04	Septiembre 23 a Octubre 04 de 2013
Sprint Backlog	- Gestionar datos básicos del paciente - Versión 1 - Base de datos para gestión del paciente
Sprint 05	Octubre 07 a Octubre 18 de 2013
Sprint Backlog	- Gestionar datos básicos del paciente - Versión 2 - Actualización base de datos para gestión de lesiones
Sprint 06	Octubre 21 a Noviembre 1 de 2013
Sprint Backlog	Gestión de diagnóstico de lesiones – Versión 1
Sprint 07	Noviembre 5 a Noviembre 15 de 2013
Sprint Backlog	- Gestión de diagnóstico de lesiones – Versión 2 - Actualización base de datos para evaluación de la movilidad articular
Sprint 08	Noviembre 18 a Noviembre 29 de 2013
Sprint Backlog	- Gestión de diagnóstico de lesiones – Versión 3 - Gestionar evaluación de la movilidad articular – Versión 1
Sprint 09	Diciembre 02 a Diciembre 13 de 2013
Sprint Backlog	- Gestionar evaluación de la movilidad articular – Versión 2 - Actualización de la base de datos para gestionar evaluación de las alteraciones en la sensibilidad - Informe Agosto-Diciembre para Colciencias
Sprint 10	Febrero 10 a Febrero 21 de 2014

Sprint Backlog	• Gestionar evaluación de las alteraciones en la sensibilidad – Versión 1 • Actualización de la base de datos para gestionar evaluación de las alteraciones en la sensibilidad
Sprint 11	Febrero 24 a Marzo 07 de 2014
Sprint Backlog	• Gestionar evaluación de las alteraciones en la sensibilidad – Versión 2 • Actualización de la base de datos para gestionar evaluación de las alteraciones en la sensibilidad
Sprint 12	Marzo 10 a Marzo 21 de 2014
Sprint Backlog	• Gestionar evaluación de las alteraciones en la sensibilidad – Versión 3 • Actualización de la base de datos para gestionar evaluación de las alteraciones en la sensibilidad
Sprint 13	Marzo 25 a Abril 4 de 2014
Sprint Backlog	• Gestionar evaluación de las alteraciones en la sensibilidad – Versión 4
Sprint 14	Abril 7 a Abril 25 de 2014
Sprint Backlog	• Gestionar evaluación de la debilidad muscular • Actualizar base de datos para gestión de evaluación de debilidad muscular
HU-002	Módulo de Instrumentación
Sprint 15	Abril 28 a Mayo 09 de 2014
Sprint Backlog	• Seleccionar y enviar trayectoria – Versión 1 • Actualización de base de datos para soportar el almacenamiento de trayectorias • Creación módulo de comunicación • Crear simulador en LabVIEW
Sprint 16	Mayo 12 a Mayo 23 de 2014
Sprint Backlog	• Seleccionar y enviar trayectoria – Versión 2 • Cargar control de deltas y enviar a Exo
Sprint 17	Mayo 26 a Junio 06 de 2014
Sprint Backlog	• Controlar estados Exoesqueleto – Versión 1
Sprint 18	Junio 09 a Junio 20 de 2014
Sprint Backlog	• Controlar estados Exoesqueleto – Versión 2 • Creación de Informe semestral para Colciencias
Sprint 19	Agosto 12 a Agosto 22 de 2014
Sprint Backlog	• Pruebas de envío de trayectorias y estados a módulo LabVIEW del Exo • Ajustes de módulo de comunicación de acuerdo a los hallazgos en las pruebas realizadas
Sprint 20	Agosto 25 a Septiembre 05 de 2014
Sprint Backlog	• Definición de trama para captura de datos del Exo • Revisión de trama con equipo de proyecto Exo y realizar ajustes

Sprint 21	Septiembre 08 a Septiembre 19 de 2014
Sprint Backlog	• Implementar captura de datos del exoesqueleto – Versión 1 • Actualización de la base de datos para soportar el almacenamiento de los datos capturados del Exo
Sprint 22	Septiembre 22 a Octubre 03 de 2014
Sprint Backlog	• Almacenar datos recibidos del exoesqueleto
Sprint 23	Octubre 06 a Octubre 17 de 2014
Sprint Backlog	• Implementar captura de datos del exoesqueleto – Versión 2
Sprint 24	Octubre 20 a Octubre 31 de 2014
Sprint Backlog	• Gestionar parámetros históricos de configuración del Exo • Actualizar base de datos para soportar el almacenamiento de datos históricos de configuración del Exo
Sprint 25	Noviembre 04 a Noviembre 14 de 2014
Sprint Backlog	• Elaboración de prototipos de gráficas para visualización de datos • Revisión de prototipos con el fisioterapeuta
Sprint 26	Noviembre 18 a Noviembre 28 de 2014
Sprint Backlog	• Implementación de fórmulas para el cálculo de datos espacio temporales
Sprint 27	Diciembre 01 a Diciembre 12 de 2014
Sprint Backlog	• Graficar Longitud de paso • Creación de informe semestral para Colciencias
Sprint 28	Febrero 09 a Febrero 20 de 2015
Sprint Backlog	• Graficar tiempo de paso
Sprint 29	Febrero 23 a Marzo 06 de 2015
Sprint Backlog	• Graficar longitud de zancada
Sprint 30	Marzo 09 a Marzo 20 de 2015
Sprint Backlog	• Graficar velocidad de marcha
Sprint 31	Marzo 24 a Abril 10 de 2015
Sprint Backlog	• Graficar ángulo de la rodilla
Sprint 32	Abril 13 a Abril 24 de 2015
Sprint Backlog	• Graficar ángulo de la cadera
Sprint 33	Abril 27 a Mayo 08 de 2015
Sprint Backlog	• Graficar ángulo de tobillo
Sprint 34	Mayo 11 a Mayo 22 de 2015
Sprint Backlog	• Graficar indicadores de electromiografía
Sprint 35	Mayo 25 a Junio 05 de 2015
Sprint Backlog	• Graficar indicadores de presión – Versión 1
Sprint 36	Junio 09 a Junio 19 de 2015
Sprint Backlog	• Graficar indicadores de presión – Versión 2
HU-003	Módulo de Reportes
Sprint 37	Agosto 18 a Agosto 28 de 2015
Sprint Backlog	• Gestionar sesiones de marcha • Actualizar base de datos y objetos de acceso a datos para soportar la generación de reportes

Sprint 38	Agosto 31 a Septiembre 11 de 2015
Sprint Backlog	• Creación de prototipo de reporte en formato PDF • Revisión y ajustes de prototipo de reportes con el fisioterapeuta
Sprint 39	Septiembre 14 a Septiembre 25 de 2015
Sprint Backlog	• Generar reportes en PDF – Versión 1
Sprint 40	Septiembre 28 a Octubre 09 de 2015
Sprint Backlog	• Generar reportes en PDF – Versión 2
	Módulo de Configuración
Sprint 41	Octubre 13 a Octubre 23 de 2015
Sprint Backlog	• Gestionar trayectorias – Versión 1 • Actualización de la base de datos y objetos de acceso a datos para soportar la administración de trayectorias
Sprint 42	Octubre 26 a Noviembre 06 de 2015
Sprint Backlog	• Gestionar trayectorias – Versión 2 • Elaboración informe semestral de Colciencias
Sprint 43	Noviembre 09 a Noviembre 20 de 2015
Sprint Backlog	• Gestionar parámetros de trayectorias – Versión 1 • Actualización de la base de datos y objetos de acceso a datos para soportar la gestión de parámetros de trayectorias
Sprint 44	Noviembre 23 a Diciembre 04 de 2015
Sprint Backlog	• Gestionar parámetros de trayectorias – Versión 2
Sprint 45	Diciembre 07 a Diciembre 18 de 2015
Sprint Backlog	• Gestionar parámetros de marcha • Actualización de la base de datos y objetos de acceso a datos para soportar la gestión de parámetros de marcha
Sprint 46	Febrero 08 a Febrero 19 de 2016
Sprint Backlog	• Gestionar parámetros de conexión • Actualización de la base de datos y objetos de acceso a datos para soportar la gestión de parámetros de conexión
	Actividades Generales
Sprint 47	Febrero 22 a Marzo 04 de 2016
Sprint Backlog	• Pruebas de interoperabilidad con el exoesqueleto, en conjunto con los ingenieros desarrolladores del Exo y el ingeniero desarrollador del módulo LabVIEW
Sprint 48	Marzo 07 a Marzo 18 de 2016
Sprint Backlog	• Implementación de ajustes a módulo de comunicación
Sprint 49	Marzo 28 a Abril 08 de 2016
Sprint Backlog	• Revisión y pruebas de usuario para módulo de hoja clínica • Ajustes al módulo de la hoja clínica
Sprint 50	Abril 11 a Abril 22 de 2016
Sprint Backlog	• Revisión y pruebas de usuario para módulo de terapia • Ajustes al módulo de terapia de acuerdo a revisión
Sprint 51	Abril 25 a Mayo 06 de 2016

Sprint Backlog	• Revisión y pruebas con usuario para módulo de reportes, para los reportes PDF • Ajustes al software de acuerdo a revisión de módulo de reportes • Elaboración informe Final para Colciencias
Sprint 52	Mayo 10 a Mayo 20 de 2016
Sprint Backlog	• Creación de reportes en formato HL7 FHIR
Sprint 53	Mayo 23 a Junio 03 de 2016
Sprint Backlog	• Ajustes a diseño de GUIs
Sprint 54	Junio 07 a Junio 17 de 2016
Sprint Backlog	• Documentación de la Vista de escenarios de arquitectura • Documentación de la Vista de lógica de arquitectura
Sprint 55	Agosto 16 a Agosto 26 de 2016
Sprint Backlog	• Documentación de la Vista de desarrollo de arquitectura • Documentación de la Vista de procesos de arquitectura
Sprint 56	Agosto 29 a Septiembre 09 de 2016
Sprint Backlog	• Documentación de la Vista física de arquitectura
Sprint 57	Septiembre 12 a Septiembre 23 de 2016
Sprint Backlog	• Documentación del modelo de datos
Sprint 58	Septiembre 26 a Octubre 07 de 2016
Sprint Backlog	• Elaboración de manual de usuario
Sprint 59	Octubre 10 a Octubre 21 de 2016
Sprint Backlog	• Creación de matriz de descomposición funcional • Elaborar cronograma de pruebas
Sprint 60	Octubre 24 a Noviembre 04 de 2016
Sprint Backlog	Creación diseño de casos de prueba funcionales y no funcionales
Sprint 61	Noviembre 08 a Noviembre 18 de 2016
Sprint Backlog	• Ejecución de pruebas funcionales - Ciclo I
Sprint 62	Noviembre 21 a Diciembre 02 de 2016
Sprint Backlog	• Ajustes al software para no conformidades identificadas – Parte 1
Sprint 63	Diciembre 05 a Diciembre 16 de 2016
Sprint Backlog	• Ajustes al software para no conformidades identificadas – Parte 2
Sprint 64	Febrero 13 a Febrero 24 de 2017
Sprint Backlog	• Ejecución de pruebas funcionales - Ciclo II
Sprint 65	Febrero 27 a Marzo 10 de 2017
Sprint Backlog	• Elaboración documento de Plan de Pruebas – Versión 1
Sprint 66	Marzo 13 a Marzo 24 de 2017
Sprint Backlog	• Elaboración documento de Plan de Pruebas – Versión 2
Sprint 67	Marzo 27 a Abril 07 de 2017
Sprint Backlog	• Ajustes a documentación para entrega final

3.2 Modelo de Datos

El modelo de datos representa el punto de partida sobre el cual se construye el sistema, por lo tanto es de suma importancia que su diseño modele adecuadamente el problema a resolver,

debido a que cambios futuros sobre el modelo de datos son de alto impacto en tiempo y costo de desarrollo de la aplicación. En el problema a resolver para el actual proyecto, se evaluó la estructura de la base de datos a utilizar, así como el manejador de base de datos, con el fin de poder soportar un gran volumen de datos, teniendo en cuenta que el exoesqueleto genera un registro cada 40 milisegundos aproximadamente, por lo tanto en una sesión de marcha de un paciente que dure 10 minutos, se pueden generar alrededor de 15.000 registros. Luego de este análisis se concluyó que era viable la implementación de un modelo relacional en el manejador de bases de datos PostgreSQL.

En la Figura 3.9 se presenta el modelo que constituye las entidades y sus relaciones en la Base de Datos. Este diagrama muestra la separación lógica de la información almacenada, teniendo en cuenta las entidades comprometidas en el problema y su solución, así como las relaciones que permiten identificar la jerarquía de las entidades y su multiplicidad. Se puede visualizar cómo el paciente es la entidad central que integra la mayoría de entidades, y también la existencia de entidades aisladas como la de trayectorias y parámetros, que contienen información que no está directamente relacionada al Paciente.

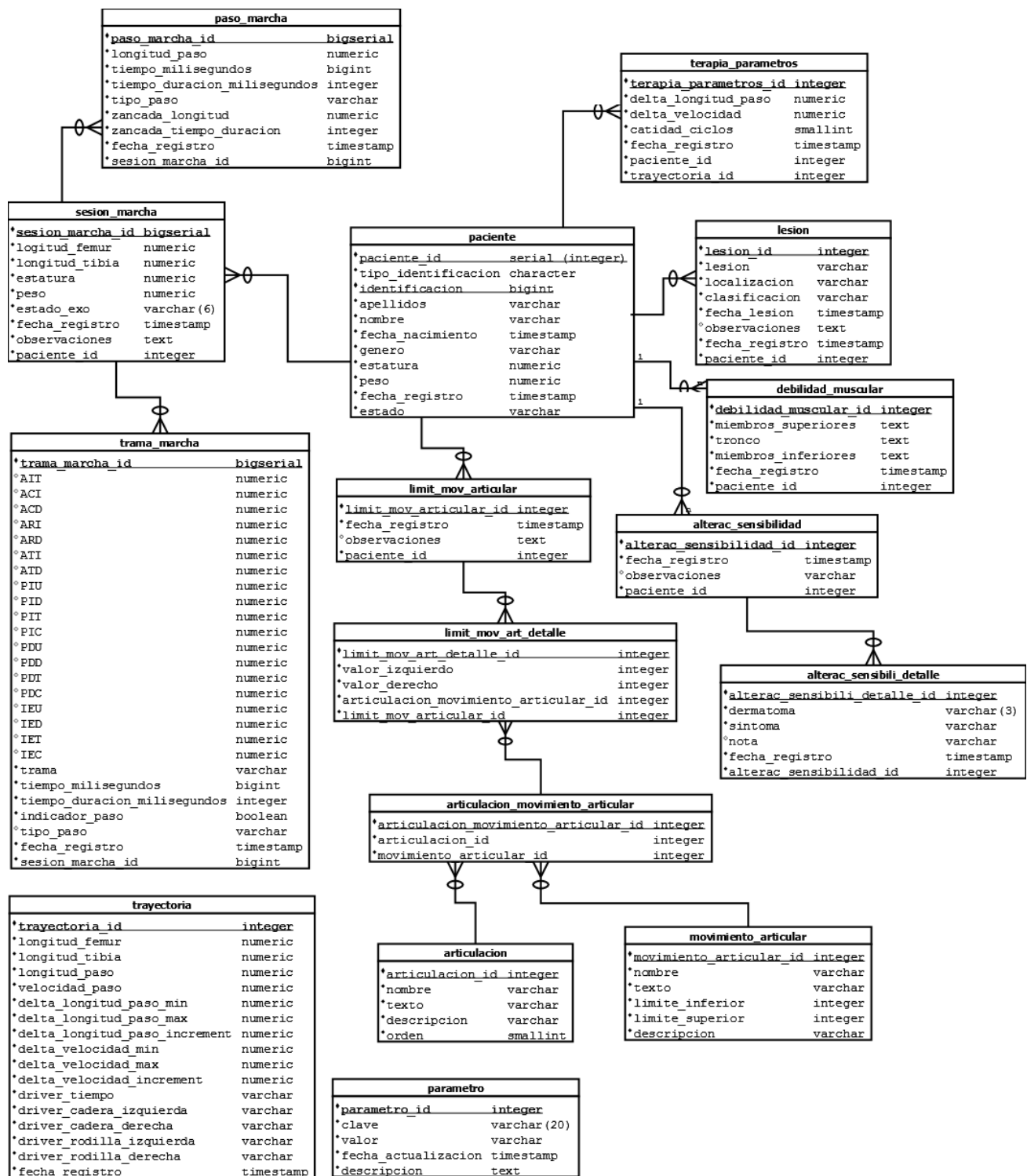


Figura 3.9: Modelo Entidad-Relación

En la Tabla 3.5 se relaciona el detalle de las entidades que componen la base de datos, presentado cada uno de sus atributos, tipo de dato y descripción.

Tabla 3.5: Descripción de las entidades de la Base de Datos

Entidad: Paciente		Entidad para el almacenamiento de la información que caracteriza al paciente.		
Atributos	Tipo	Precisión	Nulidad	Descripción
paciente_id	integer		N	Auto-numérico que identifica al paciente de manera inequívoca
tipo_identificacion	character	100	N	el tipo de identificación del paciente, que puede ser cedula, TI, cedula extranjera, etc.
identificacion	bigint		N	número de identificación del paciente
apellidos	character	200	N	apellidos del paciente
nombre	character	100	N	nombre del paciente
fecha_nacimiento	timestamp		N	fecha en la cual nació el paciente
genero	character	1	N	genero del paciente (masculino (M) o femenino (F))
estatura	numeric		N	estatura del paciente
peso	numeric		N	peso del paciente
longitud_tibia	numeric		N	La longitud de tibia es requerida para calcular long de paso y enviar trayectorias
longitud_femur	numeric		N	La longitud de tibia es requerida para calcular long de paso y enviar trayectorias
fecha_registro	timestamp		N	fecha en la cual se registra la información del paciente
estado	character	20	N	estado en el que se encuentra el paciente, puede ser ACTIVO e INACTIVO
Entidad: Lesion		Entidad en la cual se ingresará la información de las lesiones que tiene un paciente al momento de iniciar el tratamiento de rehabilitación de la marcha		
Atributos	Tipo	Precisión	Nulidad	Descripción
lesion_id	integer		N	identificador único de la lesión en la base de datos
lesion	character	200	N	nombre de la lesión que sufre el paciente
localizacion	character	200	N	Complejidad o característica de la lesión, como moderada, leve, fractura, cervical, otras.

clasificacion	character	100	N	clasificación de acuerdo a una escala como ASIA
fecha_lesion	timestamp		N	fecha en la cual ocurrió la lesión, este dato lo suministra el paciente
observaciones	text		N	información que el fisioterapeuta registra acerca del paciente, es información que quiere adicionar
fecha_registro	timestamp		N	Fecha en la cual se realiza el registro. Esta fecha es registrada por el sistema al momento de almacenar el registro
paciente_id	integer		N	llave foránea a la tabla de paciente
Entidad: debilidad_muscular		Entidad para el registro sobre la evaluación de la debilidad muscular		
Atributos	Tipo	Precisión	Nulidad	Descripción
debilidad_muscular_id	integer		N	identificador del registro en la base de datos
miembros_superiores	text		N	descripción sobre la evaluación de los miembros superiores
tronco	text		N	descripción de la evaluación a nivel de tronco
miembros_inferiores	text		N	registro de la evaluación a los miembros inferiores
fecha_registro	timestamp		N	fecha en la que se registra la evaluación. Es suministrada por el sistema
paciente_id	integer		N	llave foránea al paciente que se le realiza la evaluación
Entidad: limit_mov_articular		Entidad en la que se almacena la información de la evaluación que se realiza respecto a la movilidad articular		
Atributos	Tipo	Precisión	Nulidad	Descripción
limit_mov_articular_id	integer		N	identificador del registro en la base de datos
fecha_registro	timestamp		N	fecha en la cual se registra la información. Este datos es suministrado por el sistema
observaciones	text		Y	observaciones que el fisioterapeuta quiera

				adicionar a la evaluación realizada
paciente_id	integer		N	llave foránea a la tabla paciente, que se le realiza la evaluación
Entidad: limit_mov_art_detalle		Entidad en la que se registra el valor observado sobre el ángulo para cada movimiento de la articulación		
Atributos	Tipo	Precisión	Nulidad	Descripción
limit_mov_art_detalle_id	integer		N	es el identificador del registro en la base de datos
valor_izquierdo	integer		N	es el valor observado sobre el ángulo para un determinado movimiento de la articulación del miembro izquierdo
valor_derecho	integer		N	es el valor observado sobre el ángulo para un determinado movimiento de la articulación del miembro derecho
articulacion_movimiento_articular_id	integer		N	identificador de la tabla intermedia entre localización y movimiento articular
limit_mov_articular_id	integer		N	identificador del registro sobre la evaluación de la movilidad articular, tabla en la cual se relaciona al paciente
Entidad: limit_mov_art_detalle		Entidad intermedia entre la tabla articulación y la tabla movimiento articular, para evitar la relación muchos a muchos		
Atributos	Tipo	Precisión	Nulidad	Descripción
articulacion_movimiento_articular_id	integer		N	identificador del registro en la base de datos
articulacion_id	integer		N	llave foránea de la tabla articulación
movimiento_articular_id	integer		N	llave foránea de la tabla movimiento articular
Entidad: articulacion		Entidad que se refiere a la articulación que se está evaluando, por ejemplo Hombro, Cuello, Codo, etc.		
Atributos	Tipo	Precisión	Nulidad	Descripción
articulacion_id	integer		N	identificador del registro en la base de datos

nombre	character	100	N	nombre de la articulación (CUELLO, HOMBRO, CADERA. etc.)
texto	character	100	N	es el texto para mostrar como nombre en la interfaz gráfica, ejemplo: Rodilla
descripcion	character	500	N	es una breve descripción sobre la articulación
orden	smallint		N	es el orden en el cual deben aparecer en una lista las articulaciones
Entidad: movimiento_articular		Entidad que almacena los diferentes tipos de movimiento que puede hacer una articulación, un movimiento puede aplicar para muchas articulaciones		
Atributos	Tipo	Precisión	Nulidad	Descripción
movimiento_articular_id	integer		N	identificador del registro en la base de datos
nombre	character	200	N	nombre identificador del movimiento que realiza la articulación
texto	character	200	N	texto-nombre para mostrar en la interfaz grafica
limite_inferior	integer		N	las articulaciones tienen un ángulo de movimiento, este campo almacena el límite inferior de dicho ángulo
limite_superior	integer		N	las articulaciones tienen un ángulo de movimiento, este campo almacena el límite superior de dicho ángulo
descripcion	character	500	N	descripción sobre el tipo de movimiento de la articulación
Entidad: alterac_sensibilidad		Entidad que almacena los registros de evaluación de alteraciones en la sensibilidad		
Atributos	Tipo	Precisión	Nulidad	Descripción
alterac_sensibilidad_id	integer		N	es el identificador del registro en la base de datos
fecha_registro	timestamp		N	es la fecha en la que se hace la evaluación de sensibilidad
observaciones	text		N	comentarios que el fisioterapeuta quiere agregar al diagnostico

paciente_id	integer		N	es el identificador del paciente al que se asocia el registro
Entidad: alterac_sensibil_detalle		Entidad que almacena el detalle de la evaluación de sensibilidad		
Atributos	Tipo	Precisión	Nulidad	Descripción
alterac_sensibili_detalle_id	integer		N	identificador del registro en la base de datos
dermatoma	character	10	N	código ASIA del dermatoma seleccionado Ej.: T1,S1, etc.
sintoma	character	20	N	síntoma que describe ej.: ANESTESIA
nota	character	500	N	nota para el registro de síntoma
fecha_registro	timestamp		N	Fecha en que se registra el dermatoma
alterac_sensibilidad_id	integer		N	llave foránea al registro de evaluación de sensibilidad
Entidad: sesion_marcha		Entidad que almacena los datos de las sesiones de marcha		
Atributos	Tipo	Precisión	Nulidad	Descripción
sesion_marcha_id	bigint		N	Auto-numérico que identifica de manera inequívoca cada registro
logitud_femur	numeric		N	Almacena en metros la longitud de fémur del paciente al momento de la sesión de marcha
longitud_tibia	numeric		N	Almacena en metros la longitud de tibia del paciente al momento de la sesión de marcha
estatura	numeric		N	Almacena en metros la estatura del paciente al momento de la sesión de marcha
peso	numeric		N	Almacena en kilogramos el peso del paciente al momento de la sesión de marcha
estado_exo	character	10	N	el estado del Exo al recibir los datos, puede ser activo o pasivo

fecha_registro	timestamp		N	almacena la fecha en la que se está almacenando el registro
observaciones	text		N	observaciones para la sesión
paciente_id	integer		N	identificador del paciente que está realizando la marcha
Entidad: paso_marcha		Entidad para almacenar los datos espaciotemporales generados por el Exo		
Atributos	Tipo	Precisión	Nulidad	Descripción
paso_marcha_id	bigint		N	Auto-numérico que identifica de manera inequívoca cada registro
longitud_paso	numeric		N	longitud en metros del paso durante la marcha
tiempo_milisegundos	bigint		N	tiempo-fecha del sistema tomado en milisegundos
tiempo_duracion_milisegundos	integer		N	cantidad de milisegundos que tarda el paso
tipo_paso	character	9	N	si el paso fue derecho o izquierdo
zancada_longitud	numeric		N	longitud en metros de la zancada
zancada_tiempo_duracion	integer		N	duración en milisegundos en generarse la zancada
fecha_registro	timestamp		N	fecha del sistema al momento de almacenar la información
sesion_marcha_id	bigint		N	identificador de la sesión a la cual se asocian las variables espaciotemporales
Entidad: trama_marcha		Entidad para almacenar los datos de las tramas enviadas desde el exo		
Atributos	Tipo	Precisión	Nulidad	Descripción
trama_marcha_id	bigint		N	Auto-numérico que identifica de manera inequívoca cada registro
ait	numeric		Y	valor para Angulo de Inclinación de Tronco
aci	numeric		Y	valor para Angulo de Cadera Izquierda
acd	numeric		Y	valor para Angulo de Cadera Derecha
ari	numeric		Y	valor para Angulo de Rodilla Izquierda

ard	numeric		Y	valor para Angulo de Rodilla Derecha
ati	numeric		Y	valor para Angulo de Tobillo Izquierdo
atd	numeric		Y	valor para Angulo de Tobillo Derecho
piu	numeric		Y	valor para Indicador de Presión Izquierdo Uno
pid	numeric		Y	valor para Indicador de Presión Izquierdo Dos
pit	numeric		Y	valor para Indicador de Presión Izquierdo Tres
pic	numeric		Y	valor para Indicador de Presión Izquierdo Cuatro
pdu	numeric		Y	valor para Indicador de Presión Derecho Uno
pdd	numeric		Y	valor para Indicador de Presión Derecho Dos
pdt	numeric		Y	valor para Indicador de Presión Derecho Tres
pdc	numeric		Y	valor para Indicador de Presión Derecho Cuatro
ieu	numeric		Y	valor para Indicador Electromiográfico Uno
ied	numeric		Y	valor para Indicador Electromiográfico Dos
iet	numeric		Y	valor para Indicador Electromiográfico Tres
iec	numeric		Y	valor para Indicador Electromiográfico Cuatro
trama	character		N	cadena de texto que contiene la trama enviada desde el Exo
tiempo_milisegundos	bigint		N	se toma del sistema el tiempo-fecha en milisegundos cuando se recibe la trama
tiempo_duracion_milisegundos	integer		N	tiempo en milisegundos que tarda la trama en llegar desde la anterior recibida
indicador_paso	boolean		N	indicador booleano que identifica si una trama marca el inicio de un paso
tipo_paso	character	9	N	tipo de paso al que dio inicio la trama, izquierdo o derecho

fecha_registro	timestamp		N	fecha en la que se almacena el registro
sesion_marcha_id	bigint		N	identificador de la sesión a la cual se asocian las tramas
Entidad: trayectoria		Entidad para almacenar los archivos de trayectorias que se enviarán al Exo		
Atributos	Tipo	Precisión	Nulidad	Descripción
trayectoria_id	integer		N	auto-numérico que identifica la trayectoria de manera inequívoca
longitud_femur	numeric		N	valor para la longitud de fémur
longitud_tibia	numeric		N	valor para la longitud de tibia
longitud_paso	numeric		N	valor para la longitud de paso
velocidad_paso	numeric		N	valor para la velocidad de paso
delta_longitud_paso_min	numeric		N	valor para el delta mínimo de la longitud de paso
delta_longitud_paso_max	numeric		N	valor para el delta máximo de la longitud de paso
delta_longitud_paso_increment	numeric		N	valor para el incremento de delta de longitud de paso
delta_velocidad_min	numeric		N	valor para el delta mínimo de la velocidad de paso
delta_velocidad_max	numeric		N	valor para el delta máximo de la velocidad de paso
delta_velocidad_increment	numeric		N	valor para el incremento de delta de velocidad de paso
driver_tiempo	character		N	listado de valores del tiempo separados por punto y coma
driver_cadera_izquierda	character		N	listado de valores del ángulo de cadera izquierda separados por punto y coma
driver_cadera_derecha	character		N	listado de valores del ángulo de cadera derecha separados por punto y coma
driver_rodilla_izquierda	character		N	listado de valores del ángulo de rodilla izquierda separados por punto y coma
driver_rodilla_derecha	character		N	listado de valores del ángulo de rodilla derecha separados por punto y coma
fecha_registro	timestamp		N	fecha en la cual se registra la trayectoria

Entidad: parametro		Entidad para almacenar los parámetros de configuración de lógica de negocio de la aplicación		
Atributos	Tipo	Precisión	Nulidad	Descripción
parametro_id	integer		N	Auto-numérico que identifica los parámetros de manera inequívoca
clave	character	50	N	cadena que identifica de manera única a cada parámetro.
valor	character		N	el valor que contiene el parámetro
fecha_actualizacion	timestamp		N	fecha de actualización del parámetro
descripcion	text		N	descripción del parámetro

3.3 Vistas de Arquitectura

Para describir la arquitectura de la aplicación se siguió el Modelo de las 4+1 Vistas propuesto por Phillippe B. Kruchten [22], el cual permite representar una arquitectura a través de una vista lógica, vista de proceso, vista de desarrollo, vista física y un subconjunto de escenarios que capturan las funcionalidades más importantes del sistema. Para la representación de las vistas, el autor recomienda el uso de algunos diagramas propios de UML, tal como se describen en los numerales 3.3.1 a 3.3.5.

La documentación elaborada para el actual proyecto se generó con el objetivo de hacer la debida transferencia de conocimiento al equipo que se encargue de extender el software en sus funcionalidades, adicionalmente, COLCIENCIAS exige un mínimo de entregables, con el fin de evidenciar que los objetivos planteados fueron culminados satisfactoriamente. De acuerdo a los principios de Scrum y el manifiesto ágil, debe primar el software funcionando sobre la documentación exhaustiva, sin embargo, no significa que sea correcto la creación de la documentación necesaria de acuerdo a las características de cada proyecto.

3.3.1 Escenarios

A continuación se presentan los escenarios más relevantes del sistema, a través de diagramas de casos de uso del lenguaje de modelado UML.

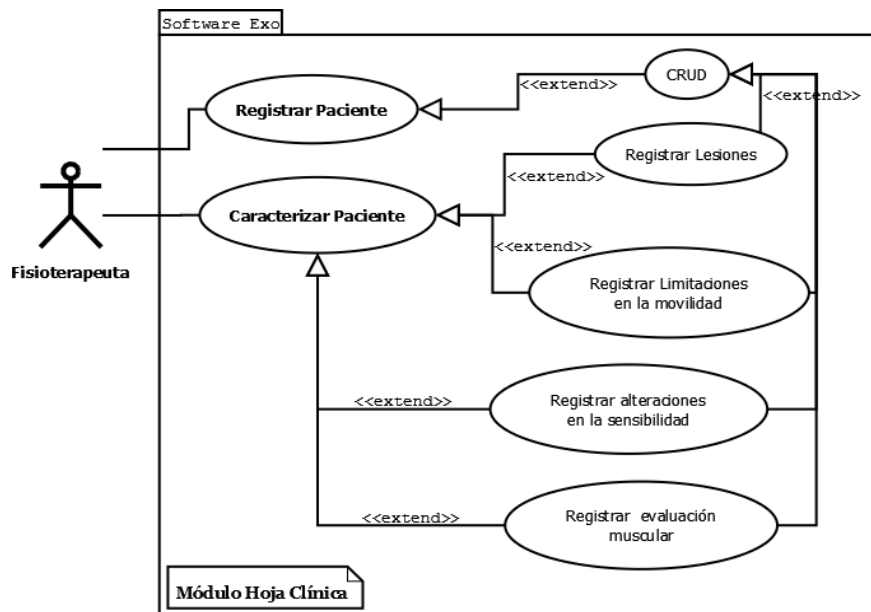


Figura 3.10: Casos de Uso Módulo Hoja Clínica

En la Figura 3.10 se relacionan los casos de uso asociados al módulo de la Hoja Clínica, donde se realiza el registro y caracterización del paciente. En este diagrama podemos ver dos casos de uso principales que son *Registrar Paciente*, por medio del cual se crea un paciente ingresando la información básica, y *Caracterizar Paciente* el cual permite asociarle información respecto a las lesiones que ha sufrido relacionadas al déficit de la marcha, así como el registro de las evaluaciones de movilidad que lleve a cabo el fisioterapeuta.

El Módulo de Terapia comprende las funcionalidades de envío de trayectorias hacia el exoesqueleto, así como la representación gráfica y almacenamiento de los datos espacio-temporales y cinemáticos recibidos. Además, el control de los estados del Exoesqueleto, tal como se muestra en la Figura 3.11.

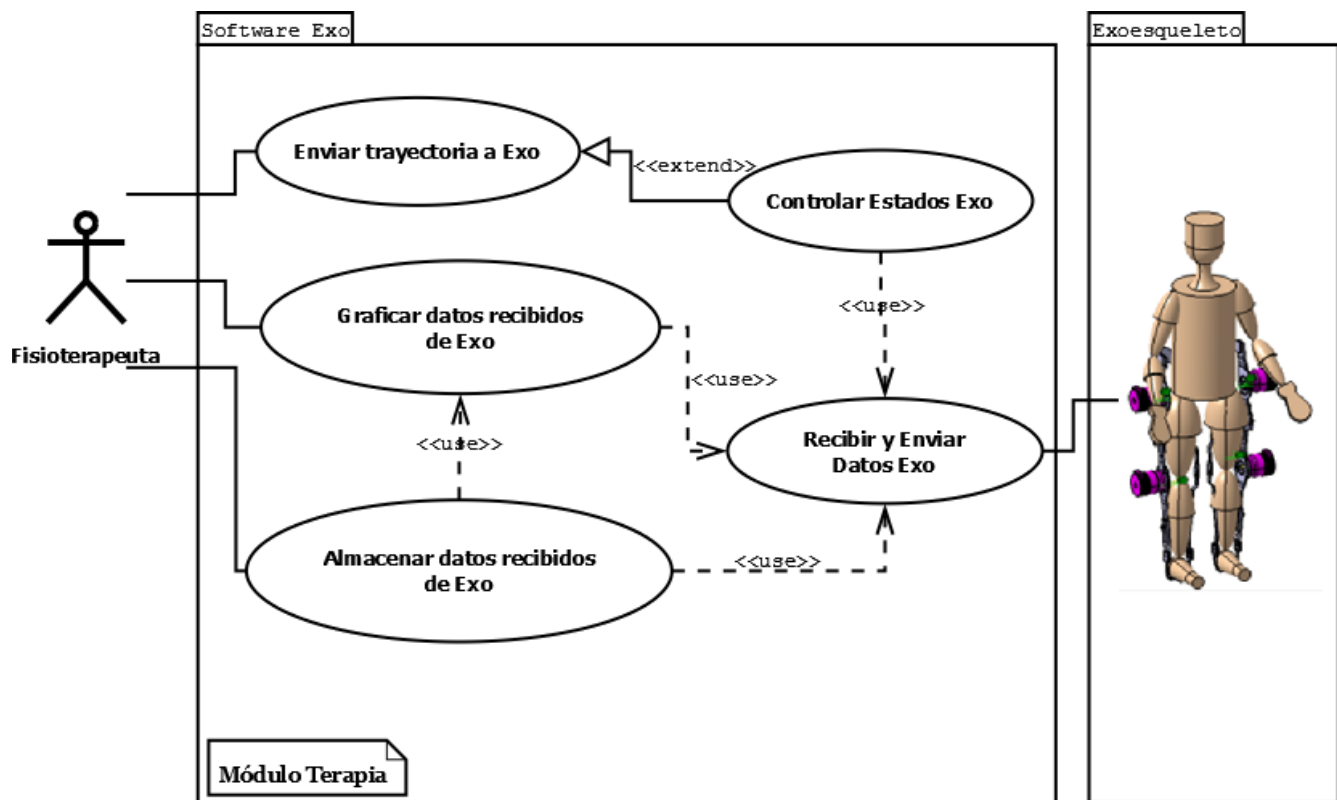


Figura 3.11: Casos de Uso Módulo de Terapia

En la Figura 3.12 y Figura 3.13 se muestran las funcionalidades referentes al módulo de reportes y el módulo de configuración respectivamente, y cómo se relacionan los diferentes roles con cada uno de los casos de uso. Vemos por ejemplo el caso *Generar Reporte* que se especializa en dos casos nuevos para la generación de reportes tipo PDF y tipo HL7. Y en la Figura 3.13 observamos un caso por cada administración de parámetros del sistema que han sido agrupados de acuerdo a la funcionalidad a la que pertenecen.

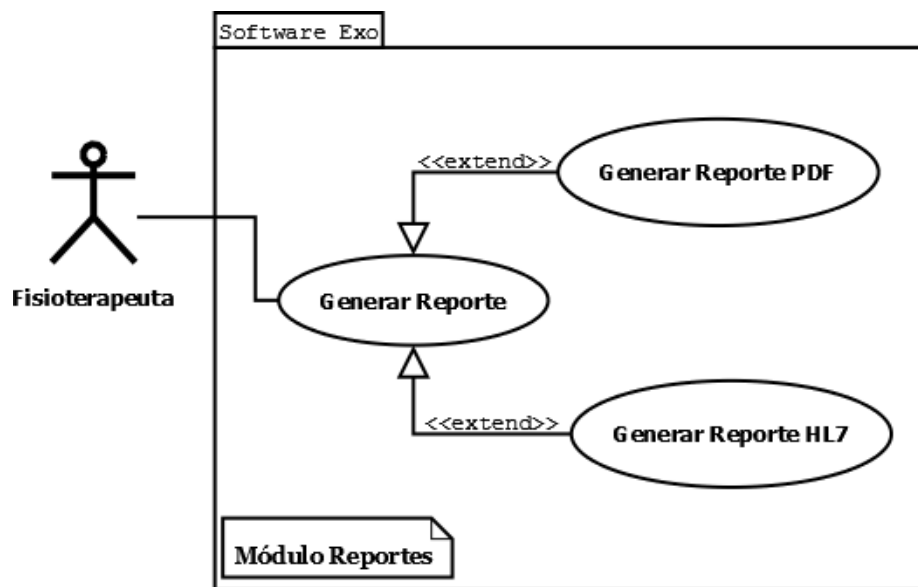


Figura 3.12: Casos de Uso Módulo de Reportes

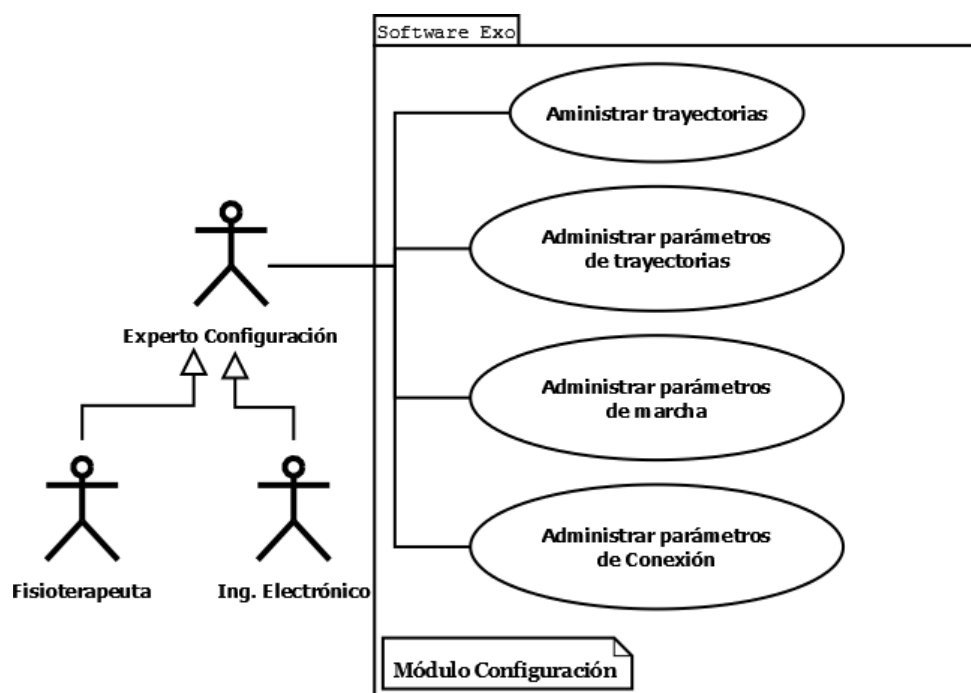


Figura 3.13: Casos de Uso Módulo de Configuración

3.3.2 Vista Lógica

En la Figura 3.14 se presenta el diagrama de clases no detallado, el cual muestra las principales clases que componen el sistema y sus relaciones. Podemos ver en este diagrama la clase principal RUVEM que extiende de la clase JFrame y a su vez se compone de las clases MedicalSheet, la cual agrupa las funcionalidades de la hoja clínica del paciente, la clase Therapy que contiene los componentes requeridos para el módulo de Terapia. La clase Reports que contiene las clases que permite generar los reportes; y la clase Settings que agrupa los controles necesarios para administrar los diferentes parámetros de configuración del sistema.

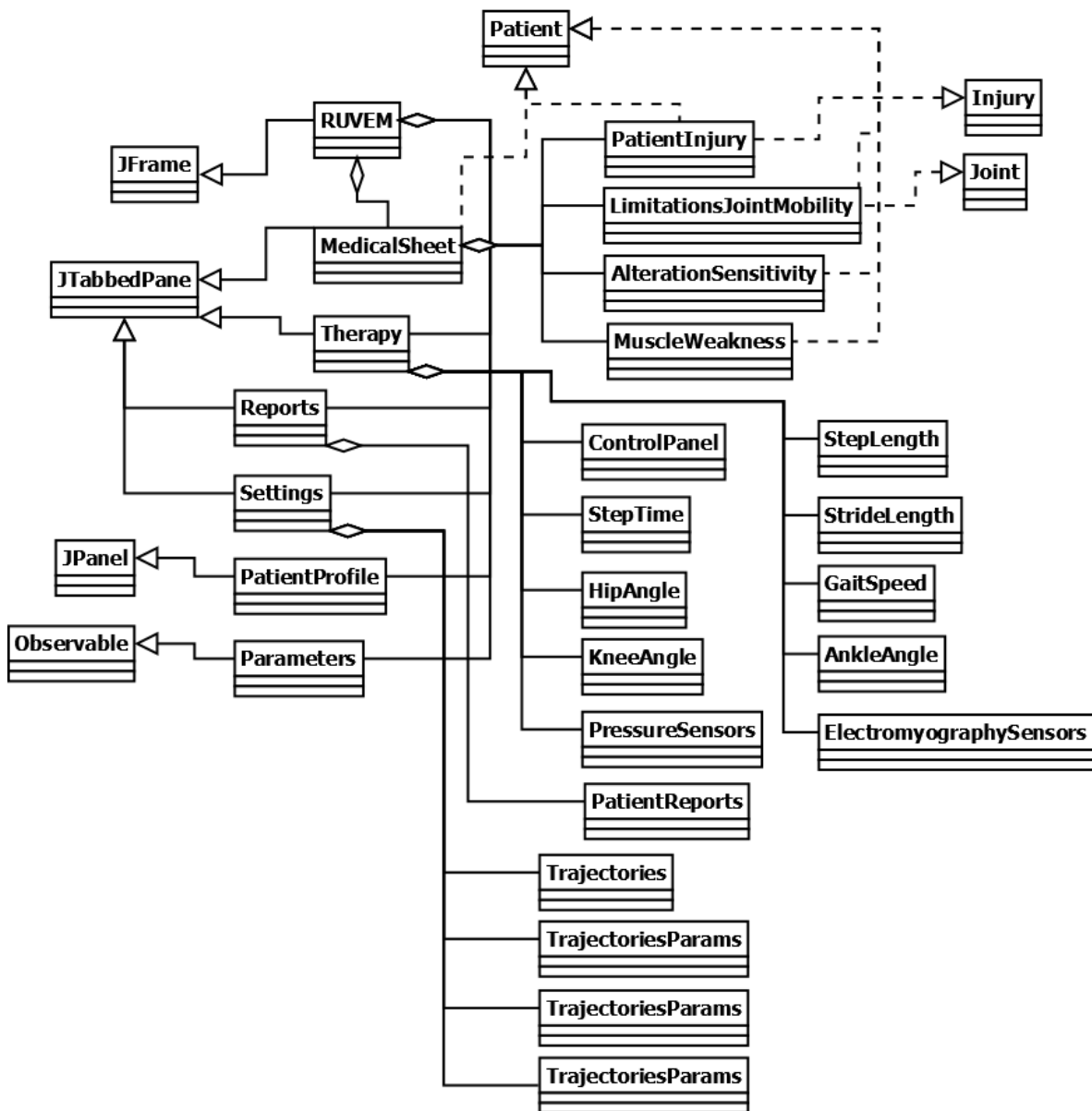


Figura 3.14: Diagrama de Clases - General

La clase RUVEM es la principal del sistema, la cual contiene el método *main* y es donde se agrupan las clases principales que componen cada uno de los módulos, tal como se muestra en la Figura 3.15. A través de los objetos contenidos en la clase RUVEM es posible acceder a la funcionalidad de cada módulo, entre los que se encuentran MedicalSheet que implementa las funcionalidades relacionadas a la Hoja Clínica; Therapy que permite la interacción con el exoesqueleto y la visualización recibida desde el mismo; Reports que contiene las funciones requeridas para la recuperación de la información en reportes especializados; y Settings que implementa los controles necesarios para la gestión de los diferentes parámetros del sistema.

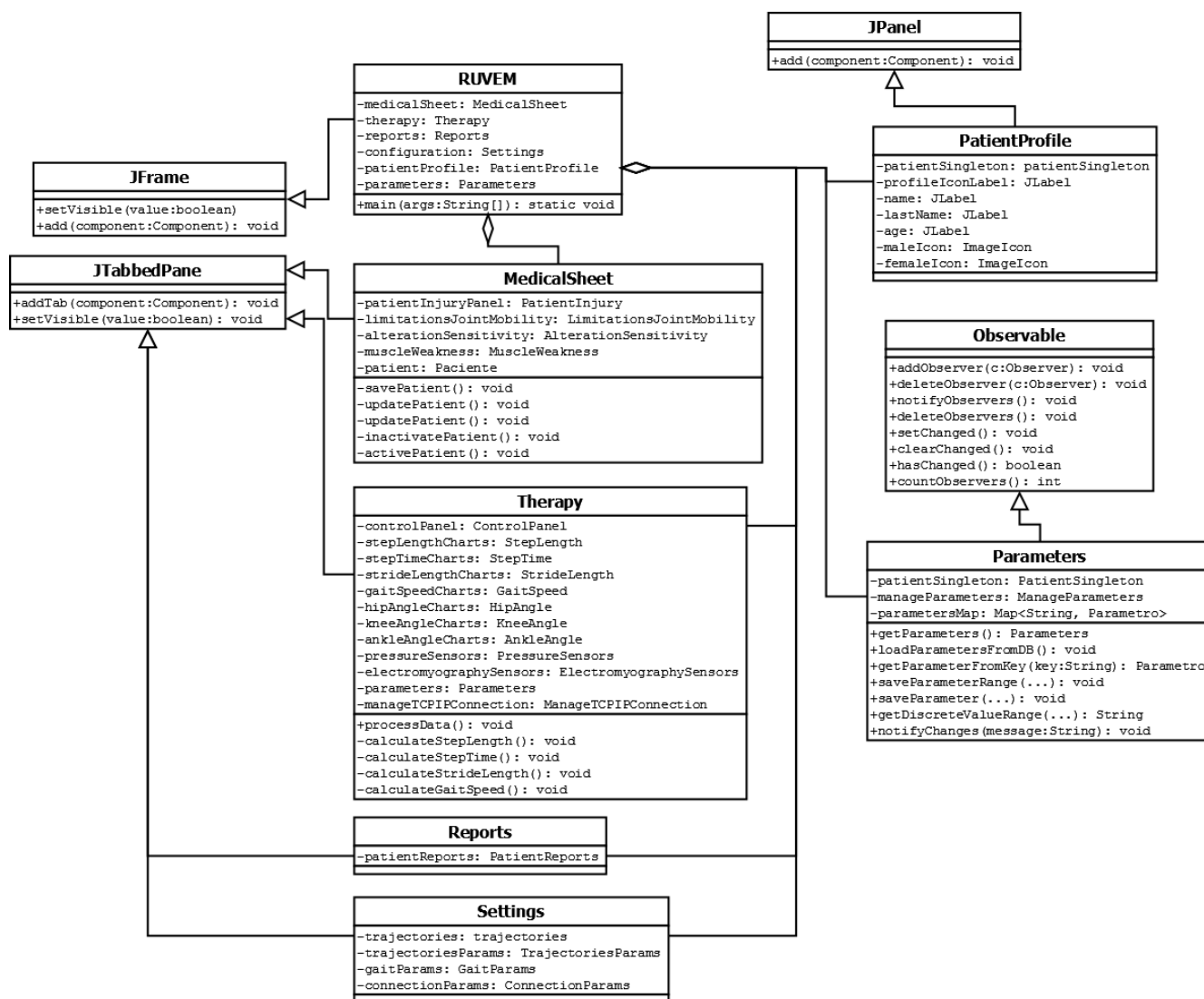


Figura 3.15 Diagrama de Clases - Detalle RUVEM

La clase MedicalSheet contiene las funcionalidades correspondientes al módulo de la Hoja Clínica, tal como se muestra en la Figura 3.16 ésta se compone de las diferentes clases que permiten la caracterización del paciente. Aquí encontramos la clase PatientInjury que

implementa la lógica y los controles requeridos para administrar la información de lesiones asociadas a la alteración de la marcha; la clase LimitationsJointMobility que contiene las funcionalidades para la captura de la información resultado de la evaluación de movilidad realizada al paciente; la clase AlterationSensitivity la cual implementa la lógica que permite registrar los datos resultantes de la evaluación de sensibilidad realizada por el fisioterapeuta al paciente. Finalmente, dentro de las clases principales se encuentra MuscleWeakness, que permite el registro de la evaluación de debilidad muscular realizada al paciente.

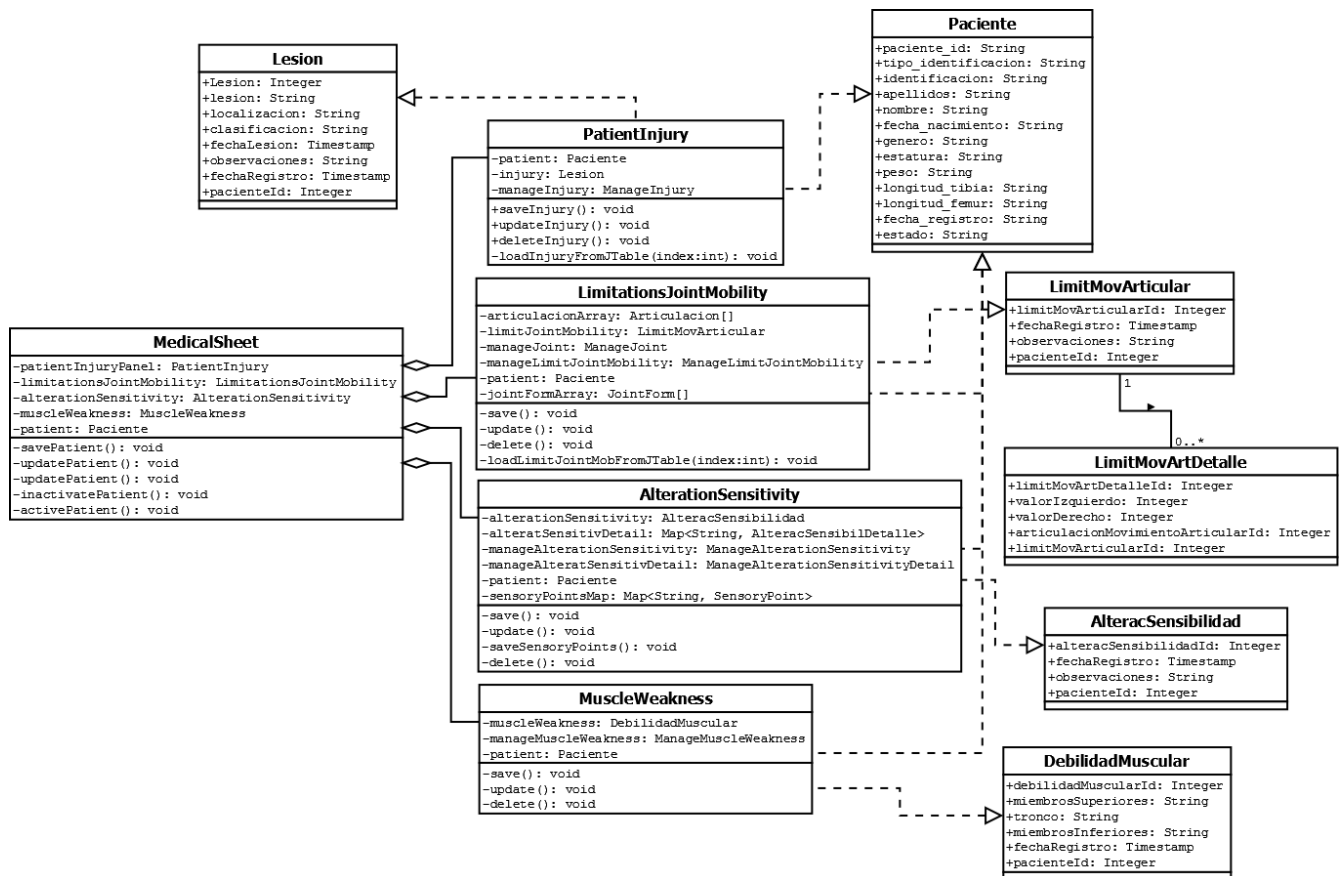


Figura 3.16: Diagrama de Clases - Detalle MedicalSheet

El módulo de terapia es el más complejo del sistema, debido a que contiene las funcionalidades que interactúan con el exoesqueleto, y como se muestra en la Figura 3.17 se compone de 10 clases principales que permiten la transferencia de datos con el exoesqueleto y la representación gráfica de los datos recibidos. La clase Therapy se encarga de integrar todas las clases del módulo y de realizar el cálculo de los datos espacio-temporales a partir de los cinemáticos recibidos desde el exoesqueleto. La clase ControlPanel permite visualizar las trayectorias que aplican para el paciente seleccionado, de acuerdo a sus medidas de fémur y tibia, además de contener los controles y objetos necesarios para enviar las trayectorias al exoesqueleto, controlar los estados del exoesqueleto, iniciar la presentación de los datos y

almacenarlos en la base de datos. Las demás clases representan cada una de ellas un dato espacio-temporal o cinemático y muestran la información a través de gráficas de línea, dispersión y barras.

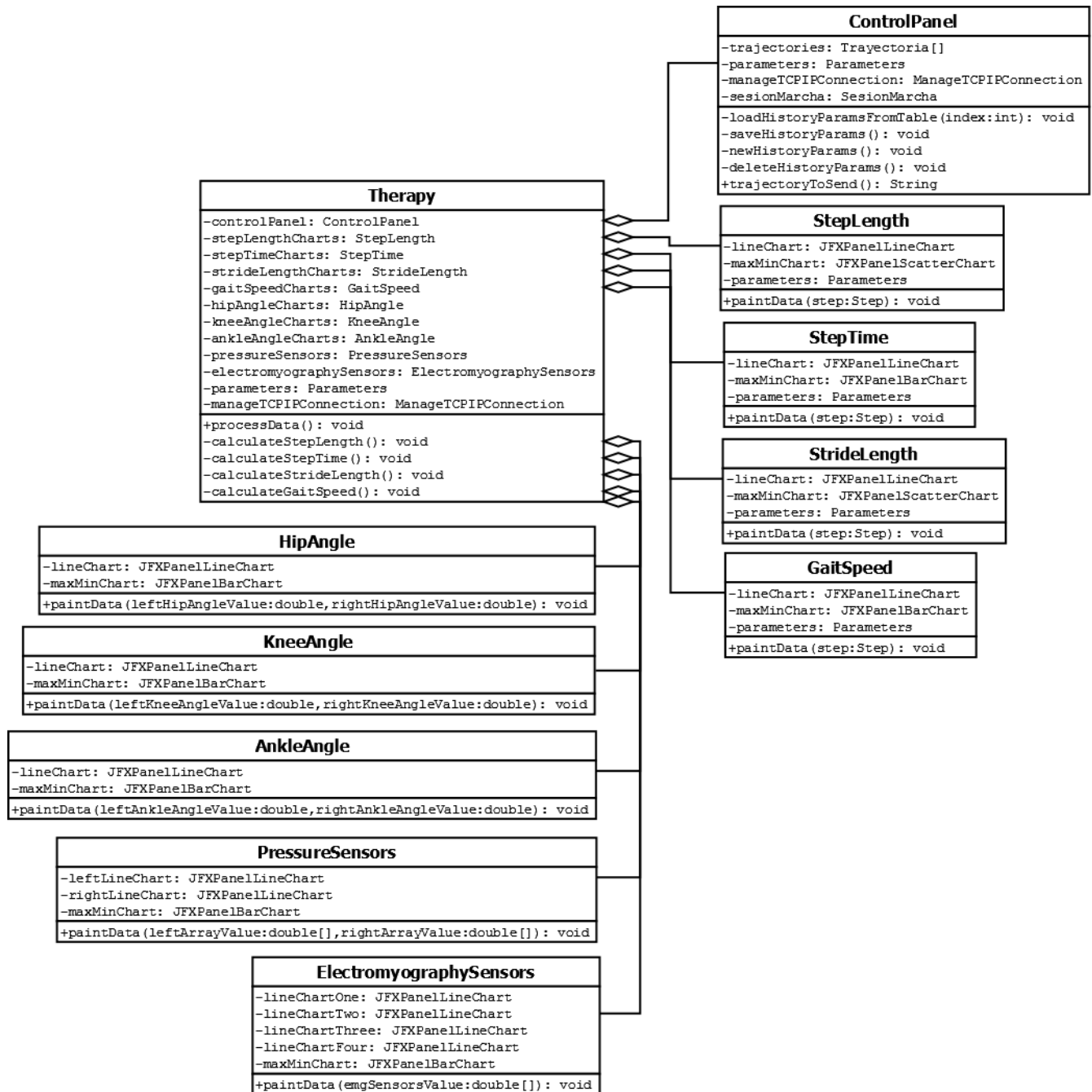


Figura 3.17: Diagrama de Clases – Detalle Therapy

En la Figura 3.18 se presentan las clases que componen el módulo de reportes, el cual permite recuperar los datos obtenidos del exoesqueleto, que fueron almacenados en la base de datos, a través de reportes PDF y HL7. La clase PatientReports se compone de las clases que

generan los reportes para el paciente seleccionado, que son las clases PDFPatientGenerator y HL7PatientGenerator, que permiten la generación del reporte seleccionado en formatos PDF y HL7 respectivamente. La clase PatientReports presenta a usuario de la aplicación la opción de seleccionar las sesiones de terapia que desea que hagan parte del reporte, donde la sesión con fecha más reciente será sobre la que se basa el reporte, y las demás sesiones seleccionadas se usarán en una sección del reporte donde se hace un comparativo histórico de los datos.

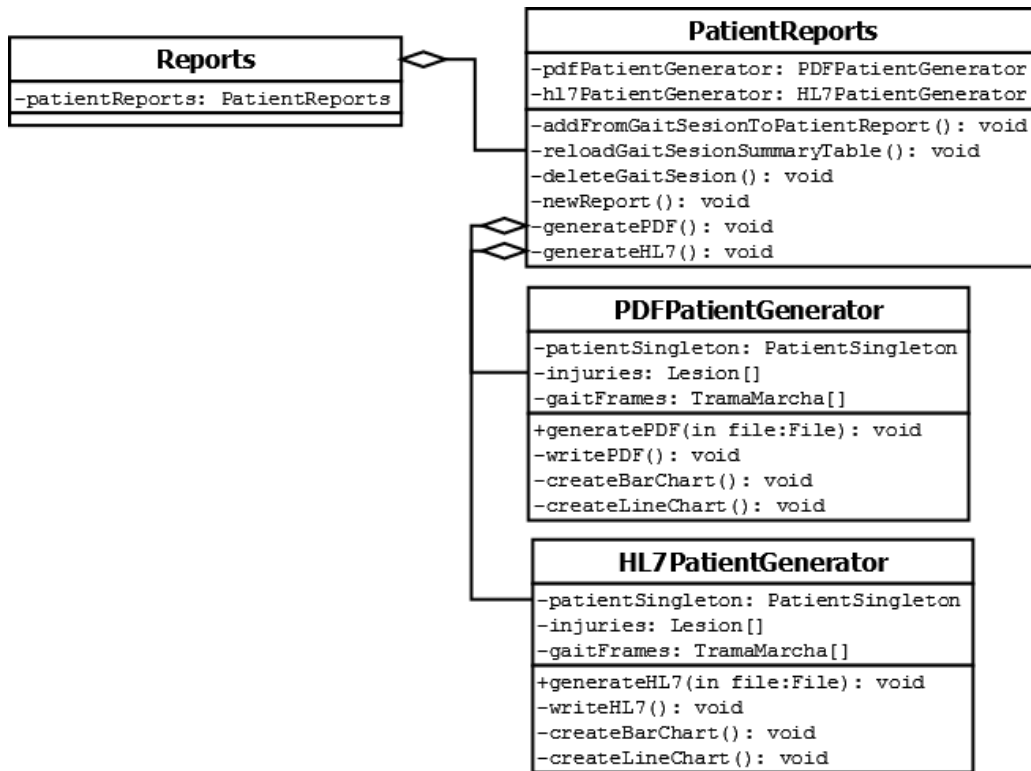


Figura 3.18: Diagrama de Clases - Detalle Reports

El módulo de configuración permite actualizar algunas variables importantes del sistema, a través de la clase Settings y las clases que la componen, como se muestra en la Figura 3.19. Las variables y datos a actualizar se han separado en diferentes clases de acuerdo a la categoría de la información. La clase Trajectories contiene la lógica que permite administrar las trayectorias ya creadas o crear nuevas; la clase TrajectoriesParams permite administrar los rangos de valores que aplican para los datos discretos ALTO, MEDIO y BAJO que se usan para representar los valores continuos de longitud de fémur, tibia, longitud de paso y velocidad de paso. La clase GaitParams permite administrar los valores normales que se muestran en las gráficas espaciotemporales del módulo de terapia. Y la clase ConnectionParams permite administrar la dirección IP y Puerto de conexión del exoesqueleto dentro de la red Lan donde se encuentre conectado el sistema.

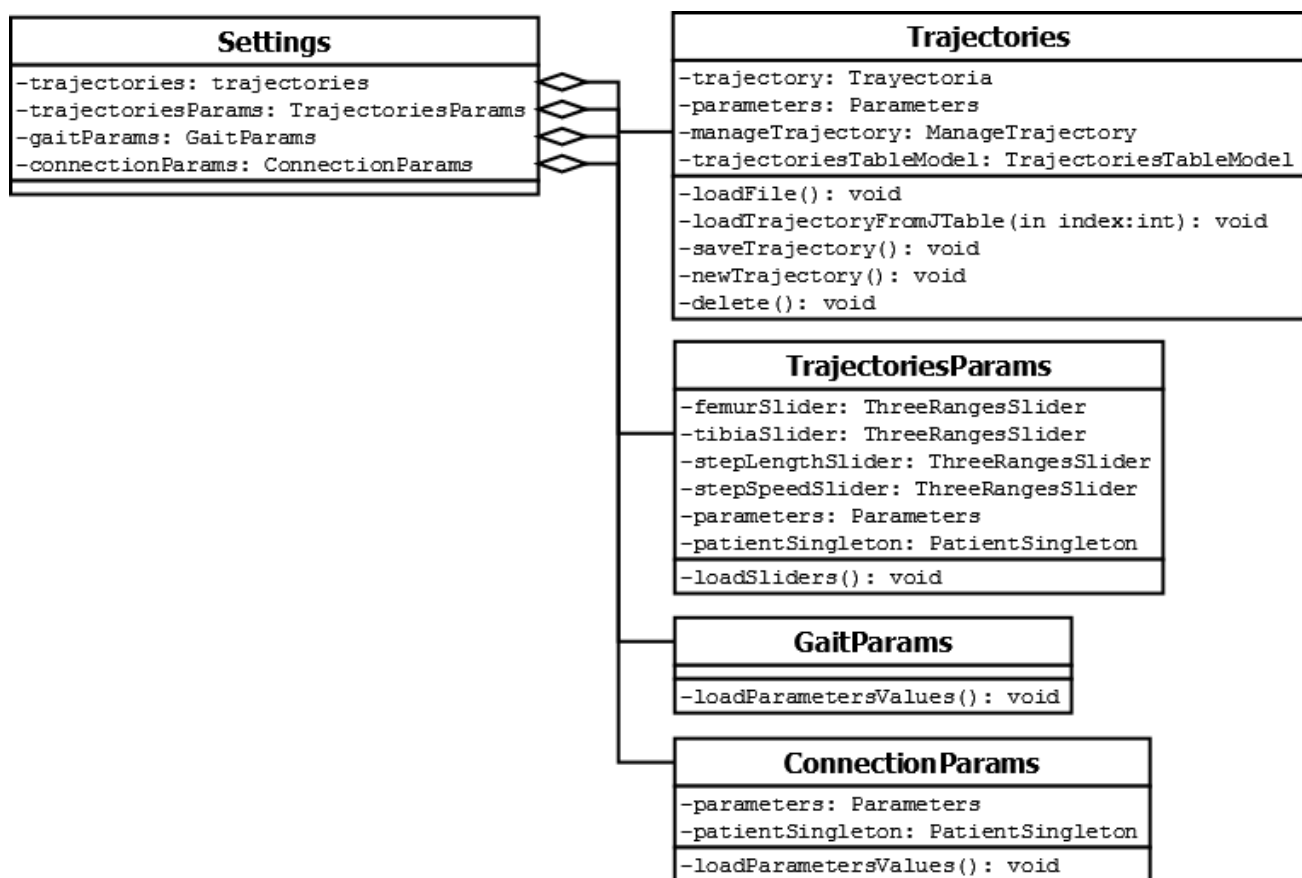


Figura 3.19: Diagrama de Clases - Detalle Settings

3.3.3 Vista de Desarrollo

El diagrama de la Figura 3.20 está basado en el estilo arquitectural de n-capas [10], que permite visualizar lógicamente a muy alto nivel cómo se organizan los componentes de software en el sistema, sus conexiones y restricciones.

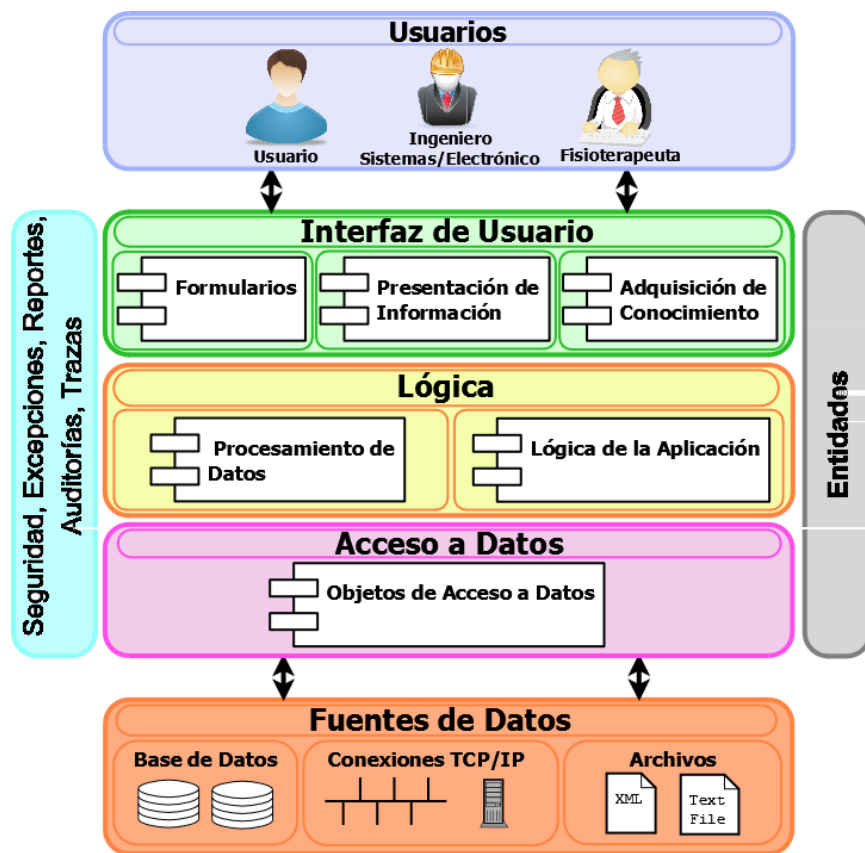


Figura 3.20: Diagrama Estilo Arquitectural n-Capas

El Sistema RUVEM se divide principalmente en tres capas teniendo así una separación lógica del código fuente, lo que permite realizar modificaciones más rápidamente en caso de ser necesario, tal como se presenta en la Figura 3.20. Las capas desarrolladas son las siguientes:

1. **Capa de Interfaz de Usuario:** Esta capa contiene todos los componentes que puede ver el usuario y con los cuales interactúa. Dependiendo del rol que desempeña el usuario en la aplicación, tiene relación con ciertas funcionalidades.
2. **Capa de Lógica:** comúnmente llamada capa de lógica de negocio, es la capa en la cual residen todos los procesos propios que se deben realizar como objetivo de la aplicación. Es la encargada de recibir todas las peticiones de la capa de interfaz de usuario, solicitar la información necesaria a la capa de acceso a datos, procesar los datos y enviar la respuesta.
3. **Capa de Acceso a Datos:** Es la capa encargada de acceder a las fuentes de datos y realizar las acciones de inserción, actualización, consulta y borrado de la información.
4. **Capa de Entidades:** Esta capa es un mapeo al lenguaje java de las entidades de la base de datos. Esta capa es transversal a toda la aplicación.

5. **Capa de Herramientas:** En esta capa se proporcionan clases útiles para el procesamiento de cadenas de texto, formatos de fechas, trazas y demás utilidades necesarias para llevar a cabo los procesos de negocio, al igual que la capa de entidades esta capa es transversal a toda la aplicación.

En la Figura 3.21 se presenta el diagrama de los principales componentes del sistema, el cual incluye las librerías, archivos y otros sistemas involucrados en la solución, así como los tipos de relación entre ellos.

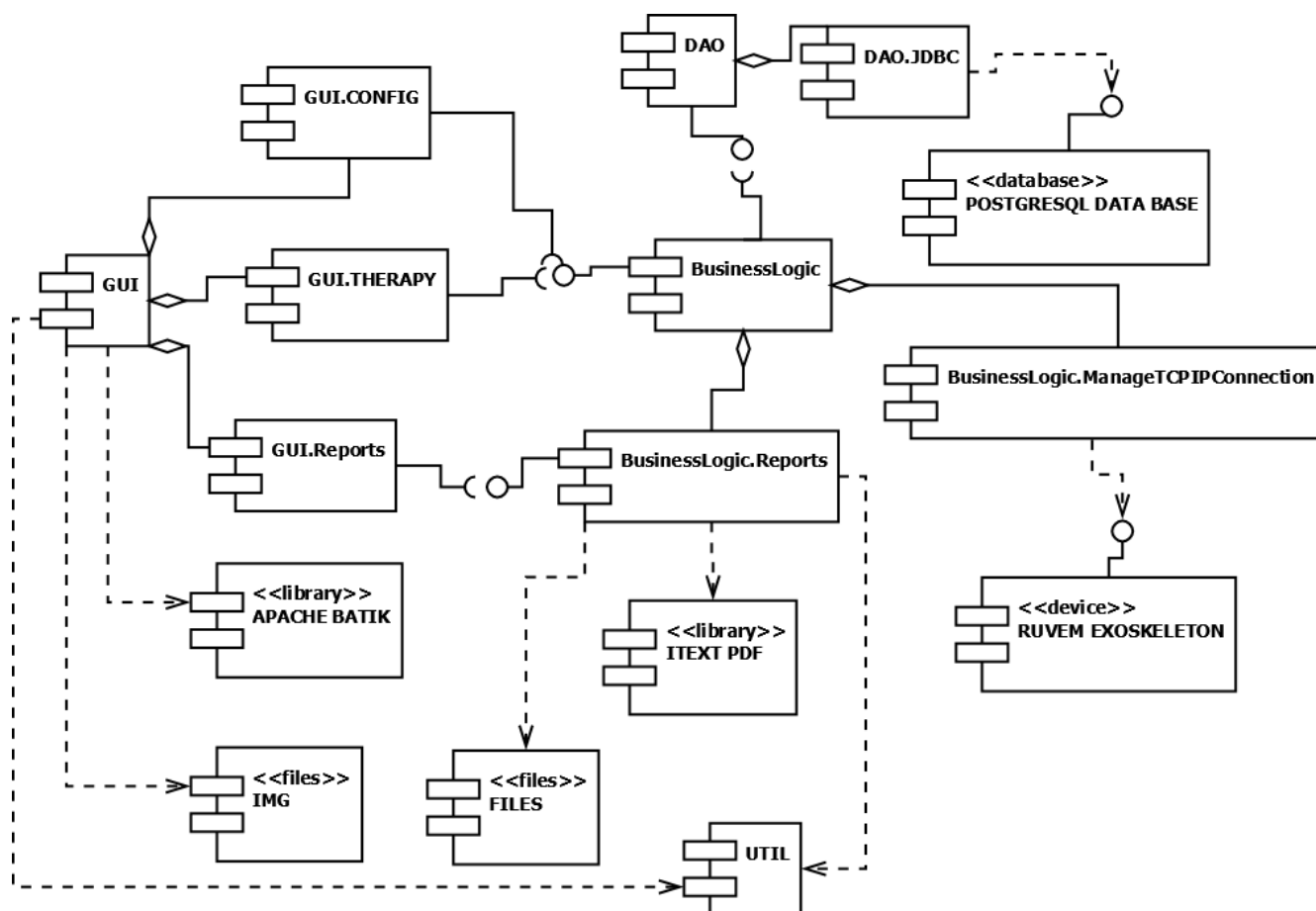


Figura 3.21: Diagrama de Componentes

3.3.4 Vista de Proceso

La vista de procesos permite visualizar los aspectos dinámicos del sistema, mediante los cuales se puede explicar los procesos y cómo se comunican entre ellos, enfocándose en el comportamiento del sistema en tiempo de ejecución. La vista de procesos además ayuda a

direccionar atributos de calidad como el rendimiento, escalabilidad, concurrencia, entre otros, y tomando así decisiones que impactan la implementación.

En la Figura 3.22 se presenta el diagrama de las actividades involucradas en la administración básica de un paciente. Este proceso comprende principalmente las actividades de creación, búsqueda, actualización y eliminación de un paciente.

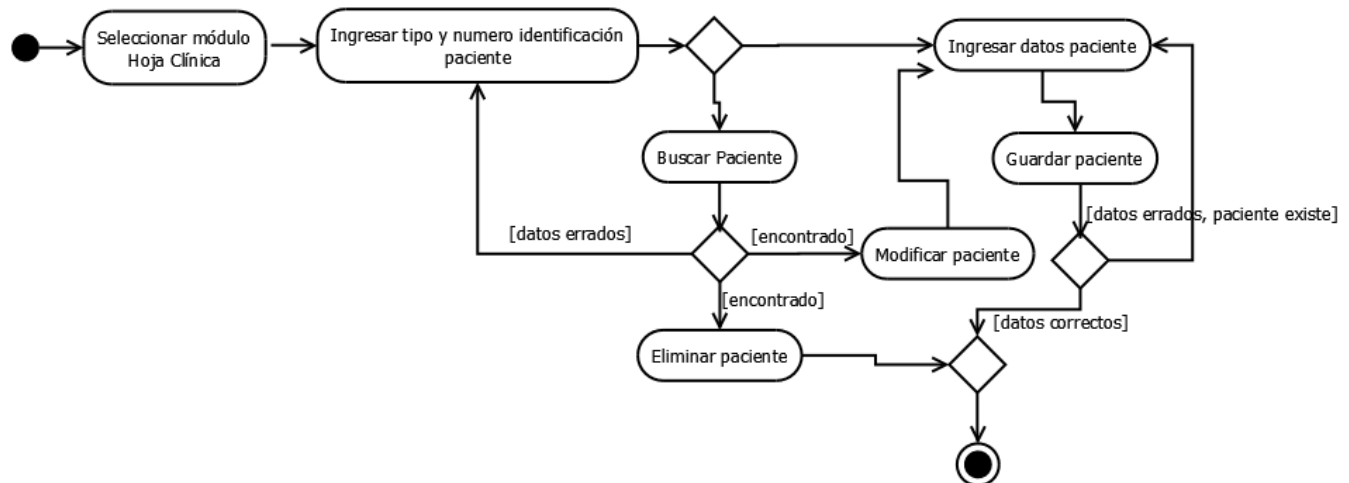


Figura 3.22: Diagrama de Actividades - Administración básica del paciente

La caracterización del paciente es el proceso en el cual se registran las lesiones que ha sufrido de tipo medular, TEC, entre otras. Igualmente se registra el resultado de la evaluación de la movilidad articular, alteraciones en la sensibilidad y debilidad muscular, tal como se muestra en la Figura 3.23.

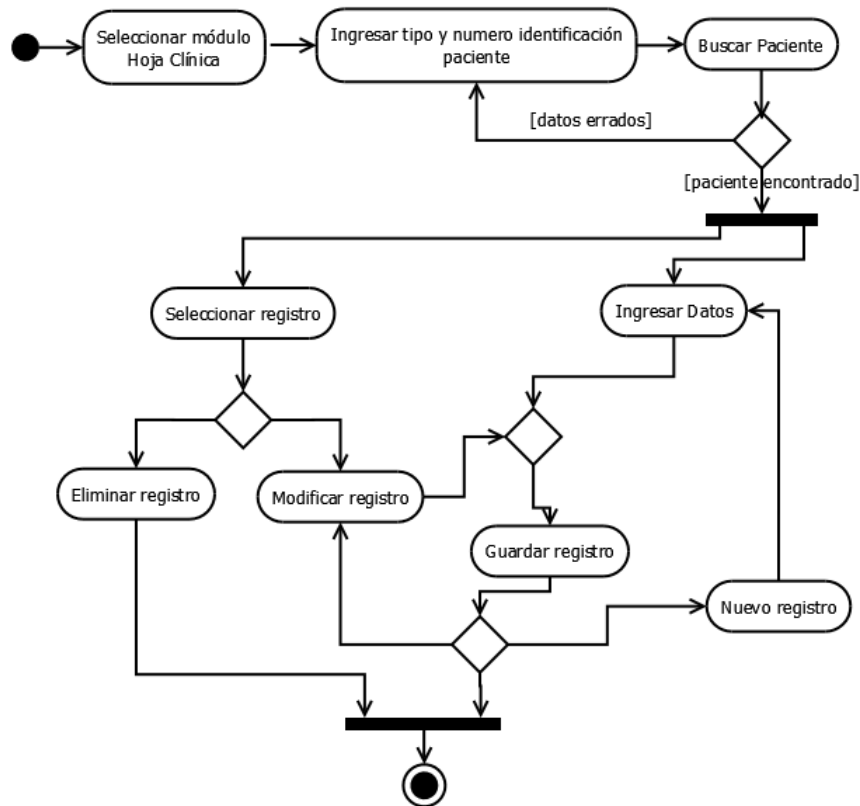


Figura 3.23: Diagrama de Actividades – Caracterizar paciente

Para iniciar una sesión de marcha el Exoesqueleto puede ser configurado en modo activo o pasivo. En el modo activo el exoesqueleto realiza los movimientos de la marcha siguiendo unos parámetros previamente configurados. Para iniciar el modo activo se debe seguir el proceso que se muestra en la Figura 3.24, en el cual se hace el envío de los parámetros de movimiento antes de iniciar la sesión de la marcha.

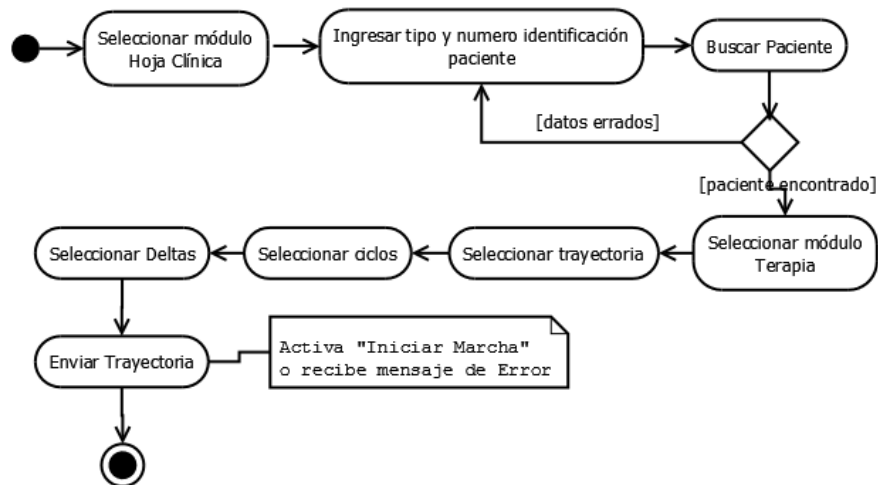


Figura 3.24: Diagrama de Actividades – Enviar Trayectorias

Una vez enviados los parámetros de marcha al Exoesqueleto, es posible dar inicio a la sesión de marcha. En la Figura 3.25 se muestra el proceso a seguir para realizar el control de la marcha. Dentro de las acciones posibles a ejecutar dentro del control está iniciar marcha, pausar marcha, continuar marcha, parar marcha y finalizar marcha.

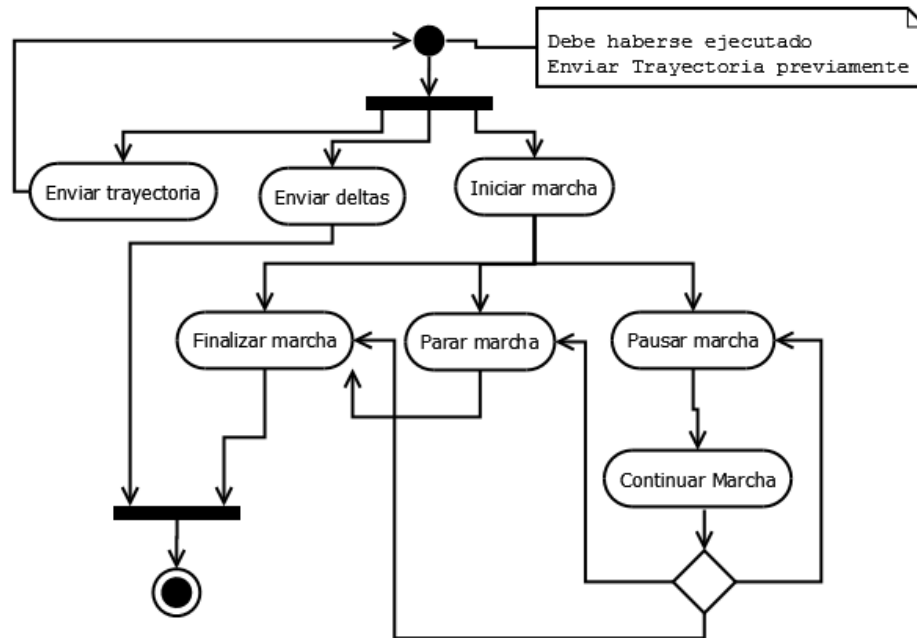


Figura 3.25: Diagrama de Actividades - Controlar Exo

En la Figura 3.26 se muestra el proceso de presentación y almacenamiento de datos recibidos del exoesqueleto, el cual permite al fisioterapeuta visualizar la información en gráficas que muestran el comportamiento de cada uno de los sensores del exoesqueleto en tiempo real.

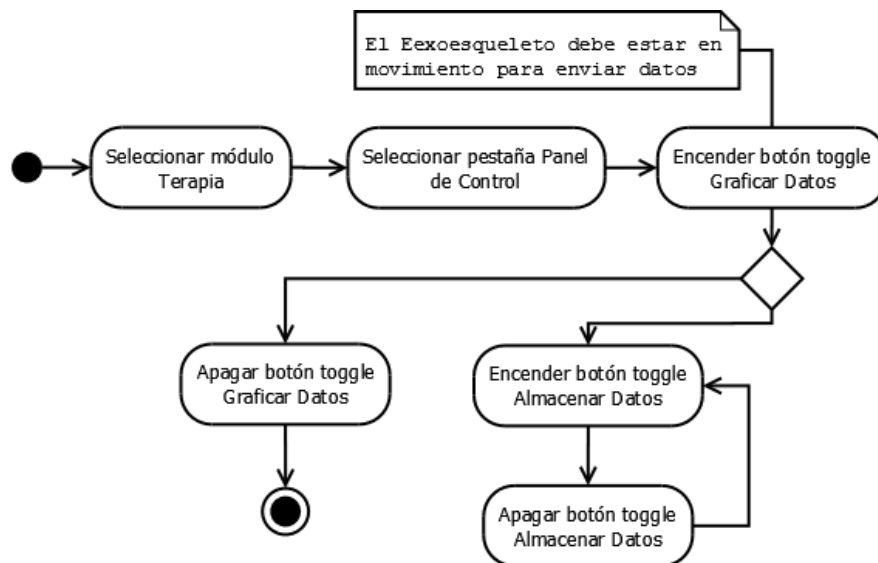


Figura 3.26: Diagrama de Actividades – Graficar/Almacenar Datos

El almacenamiento de los datos recibidos del exoesqueleto permite recuperarlos posteriormente en el formato portable PDF y en el estándar HL7 FIHR. Para llevar a cabo la generación de los reportes se debe seguir el proceso que se muestra en la Figura 3.27.

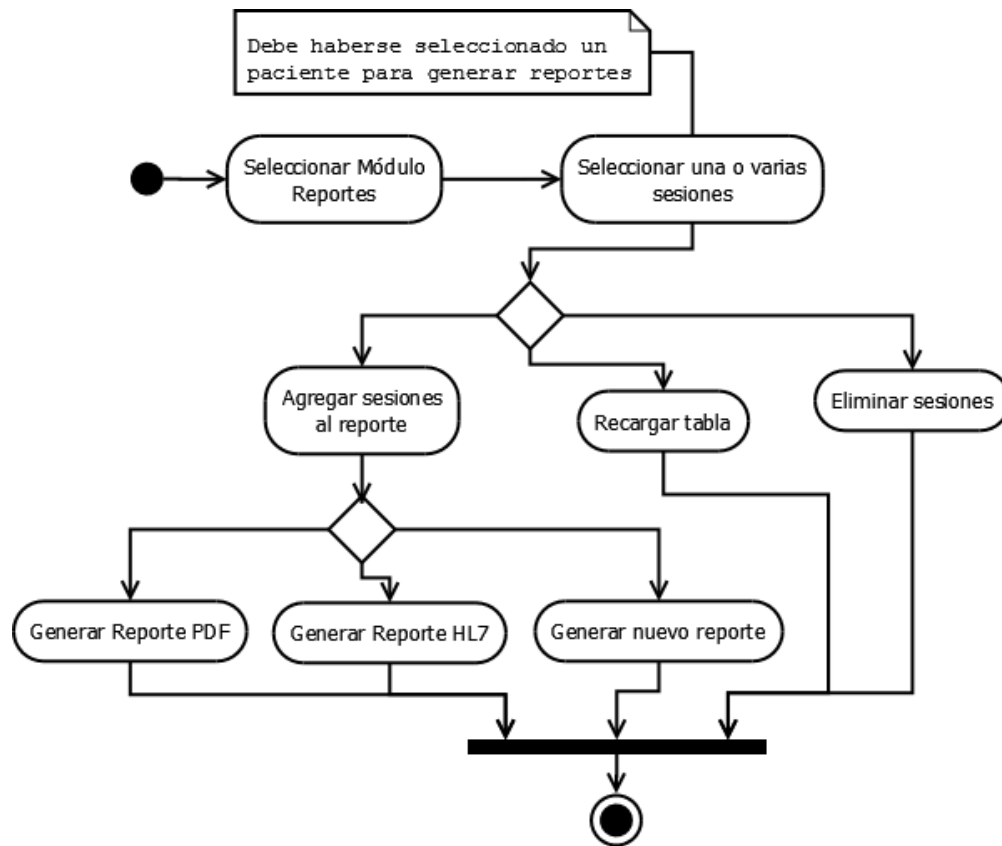


Figura 3.27: Diagrama de Actividades – Generar Reportes

3.3.5 Vista Física – Módulo de Comunicación

La vista física permite visualizar la topología de los componentes de software en la capa física y las conexiones entre los nodos físicos. En general ayuda a entender cómo se despliega el software y hardware del sistema y las relaciones que hay entre ellos. En esta sección se presenta el detalle del módulo de comunicación que se planteó desarrollar como uno de los objetivos específicos del proyecto

En la Figura 3.28 se muestra el diagrama de despliegue siguiendo el estándar UML, el cual nos permite ver cómo la aplicación al ser de tipo Aplicación de Escritorio se encuentra instalada en un solo servidor, que se comunica con el servidor de Base de Datos, el cual puede o no estar en el mismo servidor de la aplicación, y también se comunica a través de TCP/IP con el Exoesqueleto usando tramas de texto como mensajería para la comunicación.

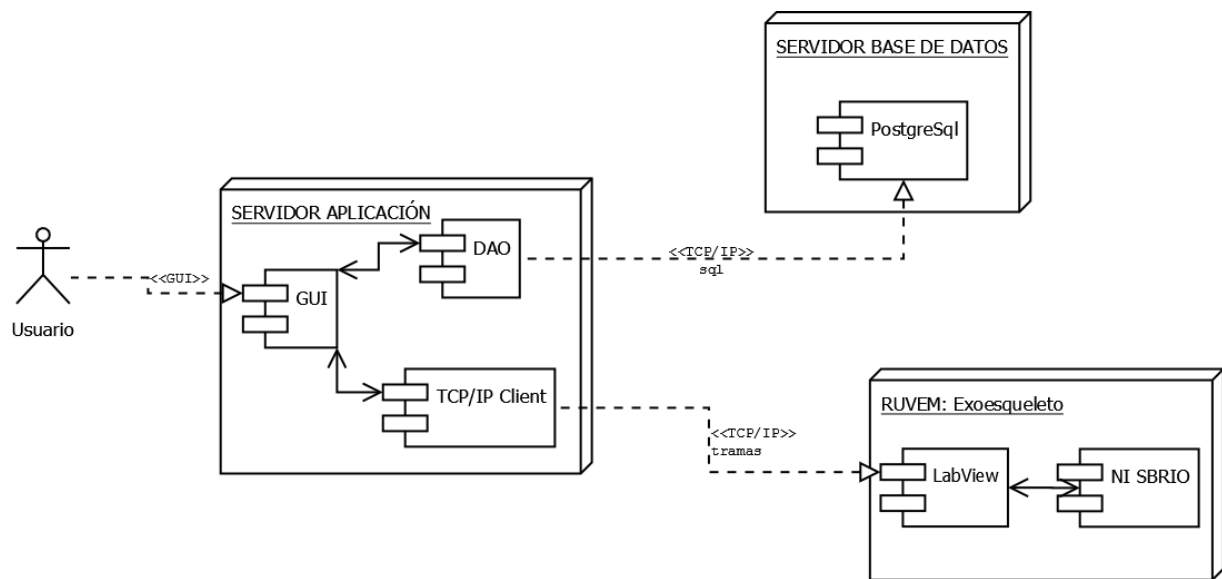


Figura 3.28: Diagrama de despliegue

La comunicación entre la aplicación y el exoesqueleto se lleva a cabo a través de tramas de texto, cuya estructura permite a ambas partes interpretar los datos recibidos. En la Tabla 3.6 se muestra la estructura que tiene una trama para el envío de la trayectoria desde la aplicación hacia el exoesqueleto. En general, la trama se compone de una cabecera más una longitud de dato y seguido del respectivo dato, así sucesivamente se crea una trama haciendo uso de diferentes cabeceras que identifican un dato específico.

Tabla 3.6: Trama envío de trayectorias

Cabecera	Trama
NDC (Número de Ciclos)	NDC + Longitud Dato(4bytes) + Dato
LDP (Longitud de Paso)	LDP + Longitud Dato(4bytes) + Dato
VDM (Velocidad de la Marcha)	VDM + Longitud Dato(4bytes) + Dato
KLP (Delta Longitud Paso)	KLP + Longitud Dato(4bytes) + Dato
KVM (Delta Velocidad Marcha)	KVM + Longitud Dato(4bytes) + Dato
ECD (Enviar Configuración Drivers)	ECD
Driver Cadera Izquierda	Longitud Dato(4bytes) + Dato
Driver Cadera Derecha	Longitud Dato(4bytes) + Dato
Driver Rodilla Izquierda	Longitud Dato(4bytes) + Dato
Driver Rodilla Derecha	Longitud Dato(4bytes) + Dato

Los datos KLP y KVM de la Tabla 3.6 también pueden ser enviados desde la aplicación al exoesqueleto de manera independiente, pudiendo tener una trama únicamente con una sola cabecera y su respectivo dato.

En la Tabla 3.7 se presentan las tramas usadas en la comunicación durante el control del Exoesqueleto en estado activo.

Tabla 3.7: Tramas para control de Exo

Dato	Descripción
ADM0	Desactivar Adquirir Datos Monitoreo
ADM1	Activar Adquirir Datos Monitoreo
STT1	Estado 1: Exo preparado para recibir datos e iniciar marcha
STT2	Estado 2 : Exo en marcha
STT3	Estado 3: Exo en pausa
STT4	Estado 4: Exo continúa marcha
STT5	Estado 5: Exo parar marcha

Los datos que indican el valor de cada uno de los sensores durante los tiempos de muestreo, son enviados desde el Exoesqueleto hacia la aplicación en una trama que se compone de varias tuplas clave/valor como se muestra en la Tabla 3.8. Estas tuplas pueden llegar en cualquier orden dentro de la misma trama, o simplemente no llegar algún dato en caso de no ser generado, y se seguirán leyendo los demás datos.

Tabla 3.8: Trama para recepción de datos monitoreo

Dato	Descripción
AIT	Identificador para Ángulo de Inclinación de Tronco
μ	Valor numérico para Ángulo de Inclinación de Tronco
ACI	Identificador para Angulo de Cadera Izquierda
μ	Valor numérico para Angulo de Cadera Izquierda
ACD	Identificador para Angulo de Cadera Derecha
μ	Valor numérico para Angulo de Cadera Derecha
ARI	Identificador para Angulo de Rodilla Izquierda
μ	Valor numérico para Angulo de Rodilla Izquierda
ARD	Identificador para Angulo de Rodilla Derecha
μ	Valor numérico para Angulo de Rodilla Derecha
ATI	Identificador para Angulo de Tobillo Izquierdo
μ	Valor numérico para Angulo de Tobillo Izquierdo
ATD	Identificador para Angulo de Tobillo Derecho
μ	Valor numérico para Angulo de Tobillo Derecho
PIU	Identificador para Indicador de Presión Izquierdo Uno
μ	Valor numérico para Indicador de Presión Izquierdo Uno
PID	Identificador para Indicador de Presión Izquierdo Dos
μ	Valor numérico para Indicador de Presión Izquierdo Dos
PIT	Identificador para Indicador de Presión Izquierdo Tres
μ	Valor numérico para Indicador de Presión Izquierdo Tres

PIC	Identificador para Indicador de P resión I zquierdo C uatro
μ	Valor numérico para Indicador de Presión Izquierdo Cuatro
PDU	Identificador para Indicador de P resión D erecho U no
μ	Valor numérico para Indicador de Presión Derecho Uno
PDD	Identificador para Indicador de P resión D erecho D os
μ	Valor numérico para Indicador de Presión Derecho Dos
PDT	Identificador para Indicador de P resión D erecho T res
μ	Valor numérico para Indicador de Presión Derecho Tres
PDC	Identificador para Indicador de P resión D erecho C uatro
μ	Valor numérico para Indicador de Presión Derecho Cuatro
IEU	Identificador para Indicador E lectromiográfico U no
μ	Valor numérico para Indicador Electromiográfico Uno
IED	Identificador para Indicador E lectromiográfico D os
μ	Valor numérico para Indicador Electromiográfico Dos
IET	Identificador para Indicador E lectromiográfico T res
μ	Valor numérico para Indicador Electromiográfico Tres
IEC	Identificador para Indicador E lectromiográfico C uatro
μ	Valor numérico para Indicador Electromiográfico Cuatro

En la Figura 3.29 se presenta la forma de calcular la longitud de paso a partir de los datos cinemáticos recibidos desde el exoesqueleto. En esta figura, ACI es el ángulo de cadera izquierda, ACD es ángulo de cadera derecha, ARD es ángulo de rodilla derecha, ARI en ángulo de rodilla izquierda y AIT es ángulo de inclinación del tronco. La longitud de paso (Ecuación (3.6)) es medida desde los tobillos (punto 1 a punto 7) y a partir de ella y el tiempo de muestreo se calcula las demás longitudes y velocidades.

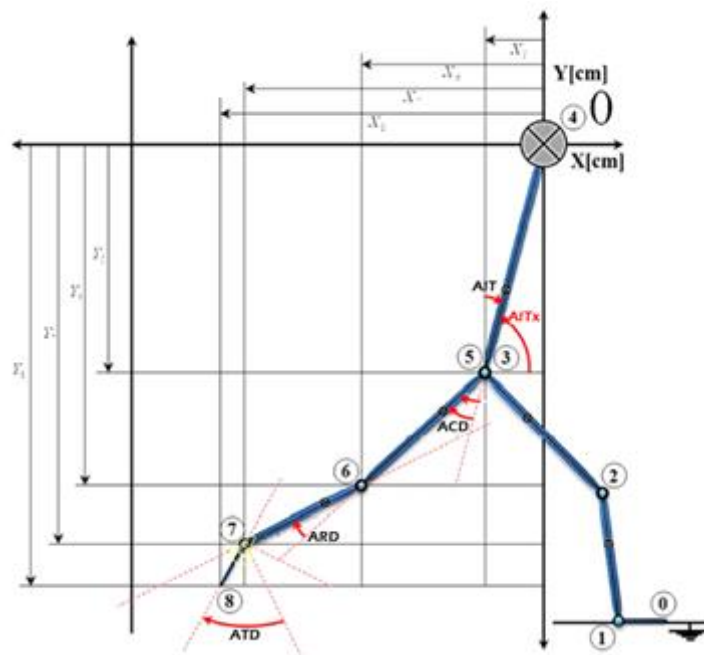


Figura 3.29: Cálculo de Longitud de Paso

Los ángulos con respecto a 0° se relacionan en las Ecuaciones 3.1 a 3.5.

$$AIT_x = 90^\circ - AIT \quad \text{Ecuación (3.1)}$$

$$ACI_x = -90^\circ - AIT - ACI \quad \text{Ecuación (3.2)}$$

$$ARI_x = ACI_x - ARI \quad \text{Ecuación (3.3)}$$

$$ACD_x = -90^\circ - AIT - ACD \quad \text{Ecuación (3.4)}$$

$$ARD_x = ACD_x - ARD \quad \text{Ecuación (3.5)}$$

$$LDP = Abs[LF\cos(ACI_x) + LT\cos(ARI_x) + LF\cos(ACD_x) + LT\cos(ARD_x)] \quad \text{Ecuación (3.6)}$$

Donde, LT es la Longitud de la Tibia, LF es la Longitud del Fémur y LDP es la longitud de paso. Las variables con subíndice x conforman los ángulos creados por las articulaciones con respecto al eje x, siendo AITx el ángulo de inclinación del tronco, ACIx el ángulo de cadera izquierda, ARIx el ángulo de la rodilla izquierda, ACDx el ángulo de la cadera derecha y ARDx es el ángulo de la rodilla derecha.

3.4 Implementación de la Aplicación

La aplicación se desarrolló bajo el concepto de aplicaciones de escritorio, esto teniendo en cuenta que no se requiere una aplicación distribuida porque todos sus componentes están en el mismo servidor, y los componentes con los que interactúa como lo es exoesqueleto RUVEM se encuentra bajo la misma red LAN y el mismo espacio físico. Algunas de las ventajas de las aplicaciones de escritorio es la velocidad de procesamiento, lo que permite mayores capacidades al desarrollar herramientas más complejas y funcionales, al igual que su robustez y estabilidad.

A continuación se presentan capturas de pantalla en las que se puede observar las funcionalidades que se han especificado a lo largo de este capítulo a través de los diferentes diagramas.

3.4.1 Módulo de Hoja Clínica

En la Figura 3.30 se puede ver la interfaz gráfica de la aplicación en general, la cual se compone de 4 elementos principales: el primero es un menú con 4 botones ubicados en la parte superior izquierda de la aplicación, cada botón al ser presionado despliega los controles

necesarios para hacer uso de las funcionalidades asociadas a cada módulo. Al lado derecho del menú se encuentra la vista rápida de la información del paciente, que permite visualizar si hay un paciente seleccionado y su información más básica. En la esquina superior derecha se encuentra una sección con los logotipos de los patrocinadores y ejecutores del proyecto. Finalmente en la parte central de la GUI ocupando la mayor parte de la ventana, se encuentra el área de trabajo, donde se despliegan los objetos asociados a cada módulo.

El módulo de la Hoja Clínica se compone de 5 pestañas que contienen la información característica del paciente, agrupando cada una de ellas los datos de su misma categoría. En la primera pestaña como se muestra en la Figura 3.30, se encuentra la información de datos básicos del paciente, de acuerdo a lo solicitado por los fisioterapeutas y la información antropométrica mínima requerida para la operación del exoesqueleto, además, un conjunto de botones que permiten administrar la información de los pacientes.

The screenshot shows a web application interface for patient data entry. The top navigation bar includes icons for home, charts, documents, settings, and a user profile for 'Raul Rojas Herrera, Paciente, 32 años'. The main content area is titled 'Datos Básicos' and contains the following fields:

Datos Básicos	
Tipo identificación	Cédula de Ciudadanía
Edad	32
Número de identificación	14623527
Género	☐ Femenino ☒ Masculino
Apellidos	Rojas Herrera
Estatura (m. Ej: 1.75)	1.75
Nombre	Raul
Peso (Kg. Ej: 80.5)	78
Fecha de Nacimiento	30/04/1984
Longitud de la Tibia (m. Ej: 0.38)	0.39
Longitud del Fémur (m. Ej: 0.4)	0.38

At the bottom of the form, there are four icons: a magnifying glass (search), a document (add), a floppy disk (save), and a trash can (delete).

Figura 3.30: Módulo Hoja Clínica - Datos Paciente

El diagnóstico de las lesiones es la caracterización que realiza el fisioterapeuta sobre las lesiones que ha sufrido el paciente y que se relacionan a la deficiencia de la marcha. La clasificación de las lesiones fue suministrada por los Fisioterapeutas vinculados al proyecto. El registro de la información se hace a través del formulario que se muestra en la Figura 3.31, el cual permite la administración de esta información y en la parte superior del formulario se puede visualizar el listado de las lesiones registradas durante el tiempo.

Registros de Lesión

Lesión	Fecha Lesión	Localización	Clasificación	Observaciones	Fecha Registro
Tumor	18/04/2014	Cuello	canceroso	ninguna	09/04/2016
Medular	14/04/2005	Torácico-T5	A	ninguna	09/04/2016
Medular	19/04/2013	Cervical-C1	B	el paciente presenta dolor especialmente en la zon...	09/04/2016
Medular	13/07/2012	Torácico-T9	C	observación	14/07/2016

Formulario de Lesión

Lesión Medular: Nivel: Clasificación ASIA:

TEC: Manifestación:

ECV: Manifestación:

Tumor-Localización: Tumor Tipo:

Osteomuscular-Localización: Osteomuscular Tipo:

Otras-Localización: Clasificación:

Fecha de la Lesión: Observaciones:

Figura 3.31: Módulo Hoja Clínica - Diagnóstico Lesiones

En la Figura 3.32 se muestra el formulario que permite almacenar la información de la evaluación de movilidad articular realizada al paciente por el fisioterapeuta, para las articulaciones de cuello, codo, hombro, tronco, antebrazo, cadera, rodilla y tobillo, de igual forma permite administrar la información a través de los botones para tal fin. Este formulario de evaluación de movilidad articular se desarrolló basándose en los formatos suministrados por los fisioterapeutas vinculados al proyecto, que incluyen el formato de examen de movilidad articular de la Facultad de Salud de la Universidad del Valle, y el formato de examen de movilidad articular del Hospital Universitario del Valle.

Paciente: Raul Rojas Herrera, 32 años

Secciones de Evaluación:

- Cuello:** Izquierdo (Flexión: 8, Extensión: -3, Rotación: 0-55, Inclínación: 0-40), Derecho (Flexión: 9, Extensión: 16, Rotación: 0-55, Inclínación: 0-40).
- Hombro:** Izquierdo (Flexión: 0-90, Flexión/Rot. Escap.: 90-180, Extensión: 0-50, Abducción: 0-90, Abducción/Rot. Escap.: 90-180, Abducción Horizontal: 135-0, Aducción/Rot. Escap.: 180-90, Aducción: 90-0, Aducción Horizontal: 0-135, Rotación Interna: 0-90, Rotación Externa: 0-90), Derecho (Flexión: 0-90, Flexión/Rot. Escap.: 90-180, Extensión: 0-50, Abducción: 0-90, Abducción/Rot. Escap.: 90-180, Abducción Horizontal: 135-0, Aducción/Rot. Escap.: 180-90, Aducción: 90-0, Aducción Horizontal: 0-135, Rotación Interna: 0-90, Rotación Externa: 0-90).
- Antebrazo:** Izquierdo (Supinación: 0-90, Pronación: 0-90), Derecho (Supinación: 0-90, Pronación: 0-90).
- Codo:** Izquierdo (Flexión: 0-145, Flexión - Pronación: 0-145, Flexión - Neutro: 0-145, Extensión: 145-0), Derecho (Flexión: 0-145, Flexión - Pronación: 0-145, Flexión - Neutro: 0-145, Extensión: 145-0).
- Tronco:** Izquierdo (Flexión: 0-110, Extensión: 0-50, Inclínación Lateral: 75-85, Rotación: 0-90), Derecho (Flexión: 0-110, Extensión: 0-50, Inclínación Lateral: 75-85, Rotación: 0-90).
- Rodilla:** Izquierdo (Extensión: 135-0, Flexión: 0-135), Derecho (Extensión: 135-0, Flexión: 0-135).
- Tobillo:** Izquierdo (Plantiflexión: 0-45, Dorsiflexión: 0-20), Derecho (Plantiflexión: 0-45, Dorsiflexión: 0-20).

Observaciones: ninguna

Fecha de Registro	Observaciones
12/09/2015	ninguna
04/08/2016	ninguna
04/08/2016	ninguna

Figura 3.32: Módulo Hoja Clínica - Evaluación Movilidad Articular

La evaluación de alteraciones en la sensibilidad que realiza el fisioterapeuta se basa en la clasificación ASIA (American Spinal Injury Association) pudiendo identificar los dermatomas específicos y el tipo de sensibilidad que presenta en cada uno de ellos. En la Figura 3.33 se muestra el componente que permite registrar el resultado de la evaluación y a su vez administrar evaluaciones previas. A través de este gráfico interactivo el fisioterapeuta puede seleccionar el tipo de alteración sensitiva que presenta el paciente, ya sea anestesia, hipoestesia, hiperestesia o dolor. Posteriormente, se seleccionan los dermatomas en los cuales se presenta dicha alteración, logrando de esta forma marcar sobre una silueta del cuerpo humano las afecciones sensitivas identificadas durante la evaluación. Adicionalmente, en caso requerirse borrar un dermatoma marcado erróneamente, se puede seleccionar la opción limpiar y posteriormente seleccionar los dermatomas que se desea regresar a su estado inicial.

Observaciones

Fecha Registro	Observaciones
14/07/2016	observación
20/01/2016	ninguno

Figura 3.33: Módulo Hoja Clínica - Alteraciones en la Sensibilidad

En la Figura 3.34 se muestra el formulario que permite registrar el resultado de la evaluación de debilidad muscular realizada al paciente por el fisioterapeuta, de acuerdo a la sección del cuerpo en la cual se va haciendo la evaluación. Así mismo se dispone un campo de texto en el cual se debe registrar lo observado.

Debilidad Muscular

Miembros Superiores

Tronco

Miembros Inferiores

Fecha de Registro

Figura 3.34: Módulo Hoja Clínica - Evaluación Debilidad Muscular

3.4.2 Módulo de Terapia

El módulo de terapia agrupa las funcionalidades que permiten la interacción con el Exoesqueleto RUVEM, como se muestra en la Figura 3.35 el módulo se compone de 10 pestañas. La primera pestaña contiene los controles para interactuar con el exoesqueleto y habilitar la recepción y almacenamiento de los datos enviados desde el exoesqueleto. Las demás pestañas contienen las gráficas que representan los datos espacio-temporales y cinemáticos recibidos.

La pestaña de control contiene las trayectorias que aplican para el paciente seleccionado de acuerdo a sus medidas antropométricas, como se observa en la Figura 3.35. Las trayectorias están listadas en una tabla, que al seleccionar una de ellas permitirá enviarla al exoesqueleto e iniciarlo en modo activo, con lo cual se activarán los botones del control de estados (ver Tabla 3.7: Tramas para control de Exo). En cualquier caso sea el modo activo o pasivo del exoesqueleto, será posible iniciar la recepción de datos y su almacenamiento a través de los botones tipo toggle ubicados en la sección Recepción de Datos.



Figura 3.35: Módulo Terapia - Panel de Control

En la Figura 3.36 se muestra las gráficas que representan la longitud de paso, de acuerdo a los datos recibidos del exoesqueleto. En General los datos son presentados desde tres tipos de gráficas, la primera al lado izquierdo es de tipo línea, y para los datos espacio-temporales

tiene la particularidad de mostrar el dato para el pie izquierdo (color verde) y el derecho (color rojo) sobre la misma línea. Este diseño fue propuesto por los fisioterapeutas, el cual les permite visualizar más fácilmente la diferencia entre las medidas recibidas para los dos pies. Adicionalmente la gráfica de línea al pausarse permite arrastrarla con el ratón hacia atrás para ver los datos anteriores. La segunda gráfica es de tipo dispersión en la cual se ubican los datos históricos ubicando el máximo, promedio y mínimo de acuerdo a la unidad de medida de cada gráfica. El tercer tipo de gráfica es de barras, y se utiliza al igual que el de dispersión para visualizar los datos máximo, promedio y mínimo principalmente para los datos cinemáticos.

En todas las gráficas es posible visualizar el valor en cada punto pasando el ratón por encima del dato que se desea conocer. También es importante resaltar que los valores normales que aparecen graficados son valores parametrizados en el módulo de configuración, el cual se detallará en la sección 3.4.4 Módulo de Configuración.



Figura 3.36: Módulo Terapia - Longitud de Paso

El tiempo de paso es representado por una gráfica de línea y una de barras, tal como se visualiza en la Figura 3.37.



Figura 3.37: Módulo de Terapia - Tiempo de Paso

En la Figura 3.38 se presenta los datos de longitud de zancada. La zancada básicamente son dos pasos, y de acuerdo al pie con el que se dé inicio se toma como izquierda o derecha.



Figura 3.38: Módulo de Terapia - Longitud de Zancada

La velocidad de la marcha se calcula utilizando la longitud del paso y el tiempo obtenido entre cada paso, como se muestra en la Ecuación (3.7). En la Figura 3.39 se muestra las gráficas que representan este dato.

$$V = \frac{LDP}{(t2-t1)} \quad \text{Ecuación (3.7)}$$

Donde, LDP es la Longitud De Paso, t2 es el tiempo actual del sistema, t1 es el tiempo del sistema en el paso anterior y V es la velocidad de la marcha.

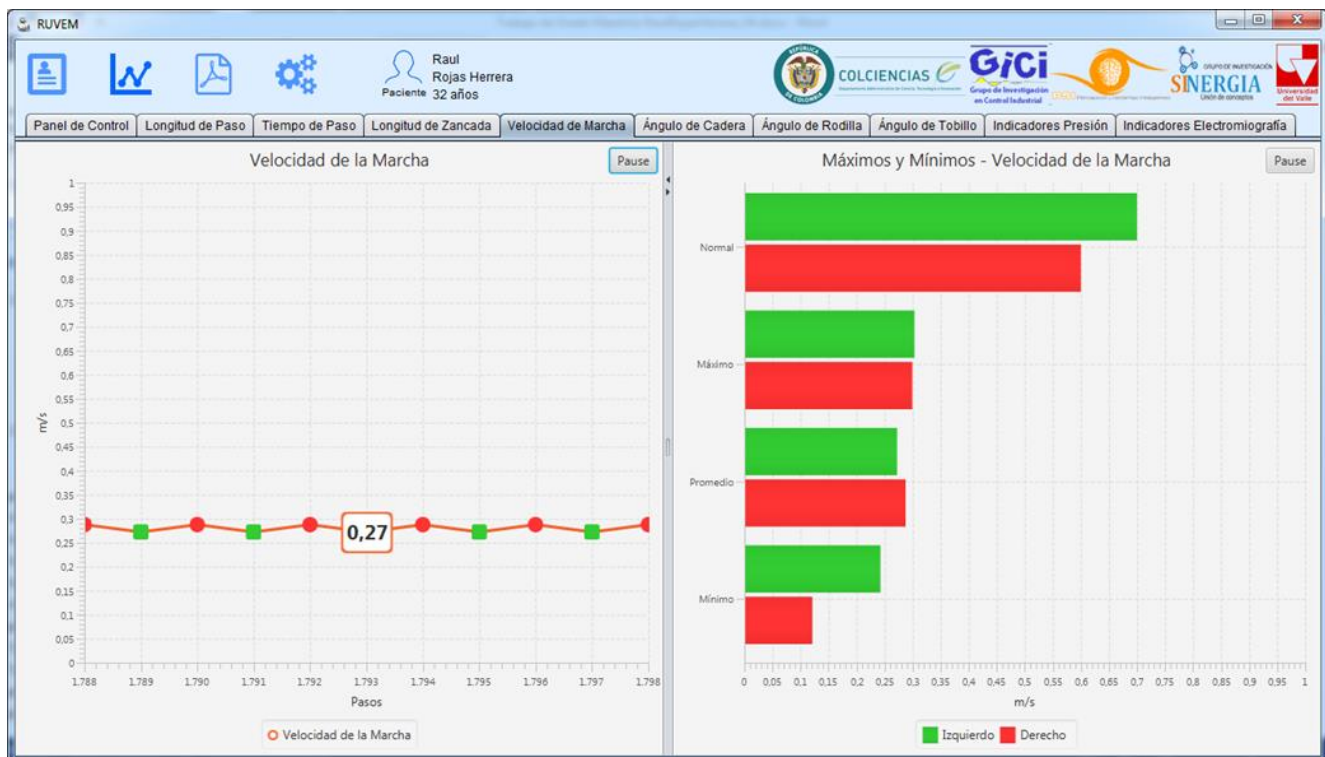


Figura 3.39: Módulo de Terapia - Velocidad de la Marcha

Para los ángulos de las articulaciones el exoesqueleto envía en cada tiempo de muestreo el valor que en ese momento tiene el sensor correspondiente, de acuerdo al tipo de movimiento que realiza la articulación. En las gráficas de máximos y mínimos para los datos cinemáticos se puede observar que no cuenta con los valores normales (valores de referencia en los datos espacio-temporales), esto debido a que no es significativo tener este dato para variables cinemáticas. Como se muestra en la Figura 3.40 en este caso si es importante dibujar cada

dato en una línea independiente, pero superpuestas para visualizar las diferencias que se presenta en cada momento entre los movimientos del lado izquierdo y derecho de la cadera. En el eje Y se representan los grados que mide cada sensor durante el movimiento, y en el eje X se presenta cada dato de muestra, que se relaciona al tiempo de muestreo.



Figura 3.40: Módulo de Terapia - Ángulo de Cadera

En la Figura 3.41 se muestra el ángulo de la rodilla, en la cual se puede diferenciar con el de la cadera por el tipo de movimientos que pueden realizar. En el eje Y se representan los grados que mide cada sensor durante el movimiento, y en el eje X se presenta cada dato de muestra, que se relaciona al tiempo de muestreo.



Figura 3.41: Módulo de Terapia - Ángulo de Rodilla

En la Figura 3.42 se puede visualizar las gráficas que representan los datos recibidos para el ángulo de tobillo. En el eje Y se representan los grados que mide cada sensor durante el movimiento, y en el eje X se presenta cada dato de muestra, que se relaciona al tiempo de muestreo.



Figura 3.42: Módulo de Terapia - Ángulo de Tobillo

Los sensores de presión están ubicados en la planta del pie del exoesqueleto, teniendo cuatro sensores en cada pie, y cada uno de ellos indica el nivel de presión que está siendo medido sobre cada uno de los sensores en cada momento. En la Figura 3.43 se muestra las gráficas que representan estos datos, para facilitar la identificación de cada sensor dentro de la gráfica, se utilizó una gráfica de línea para cada pie, y colores diferenciados entre ellos. En el eje Y se representan los datos recibidos del sensor de presión en una escala de 1 a 10 unidades, y en el eje X se presenta cada dato de muestra, que se relaciona al tiempo de muestreo.

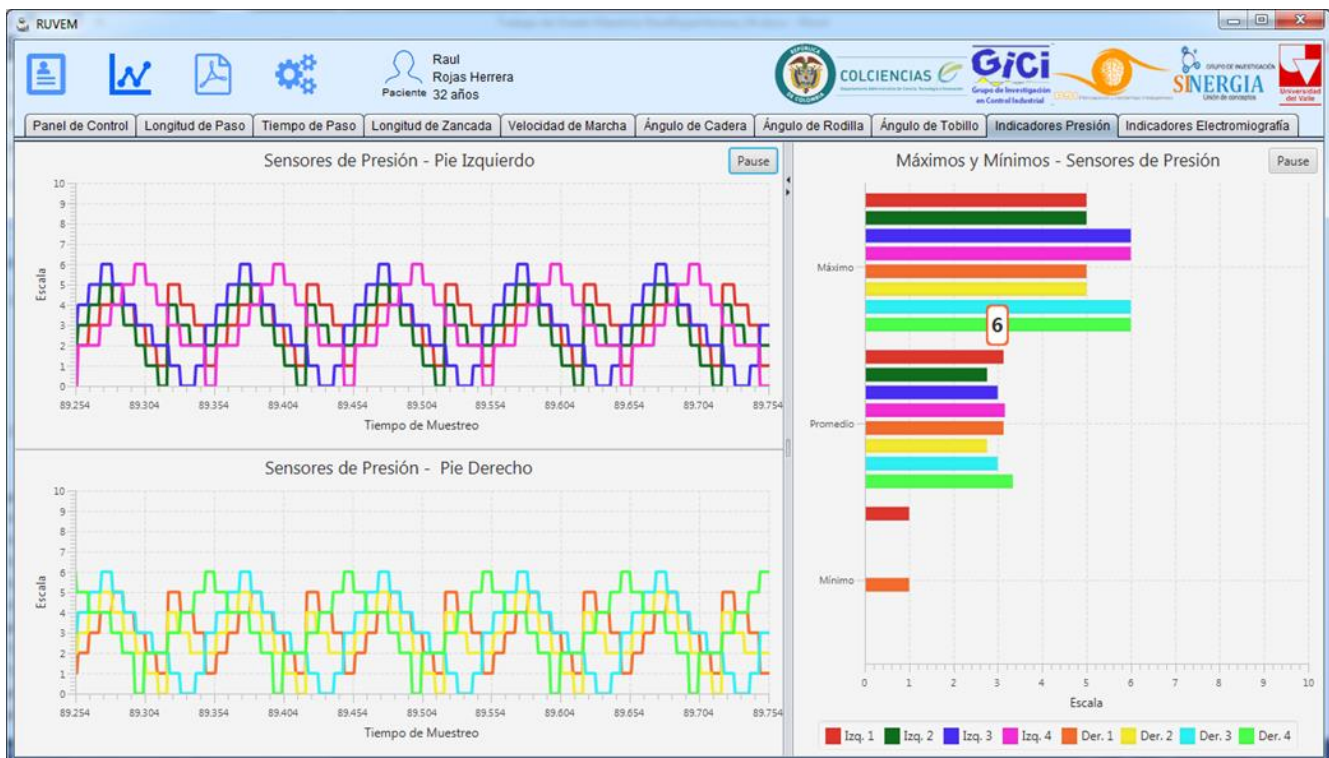


Figura 3.43: Módulo de Terapia - Indicadores de Presión

El exoesqueleto cuenta con 4 sensores de electromiografía que pueden ser ubicados libremente en cualquier músculo del cuerpo a decisión del fisioterapeuta. En la Figura 3.44 se visualiza las gráficas que representan los datos, para facilitar la visualización de estos se utilizó una gráfica para cada sensor. Debido a que las características de los datos dificultan poder identificar claramente datos al ser pintados en la misma gráfica. En el eje Y se representan los datos recibidos del sensor de electromiografía en Voltios de Corriente Directa (VDC en inglés), y en el eje X se presenta cada dato de muestra, que se relaciona al tiempo de muestreo.

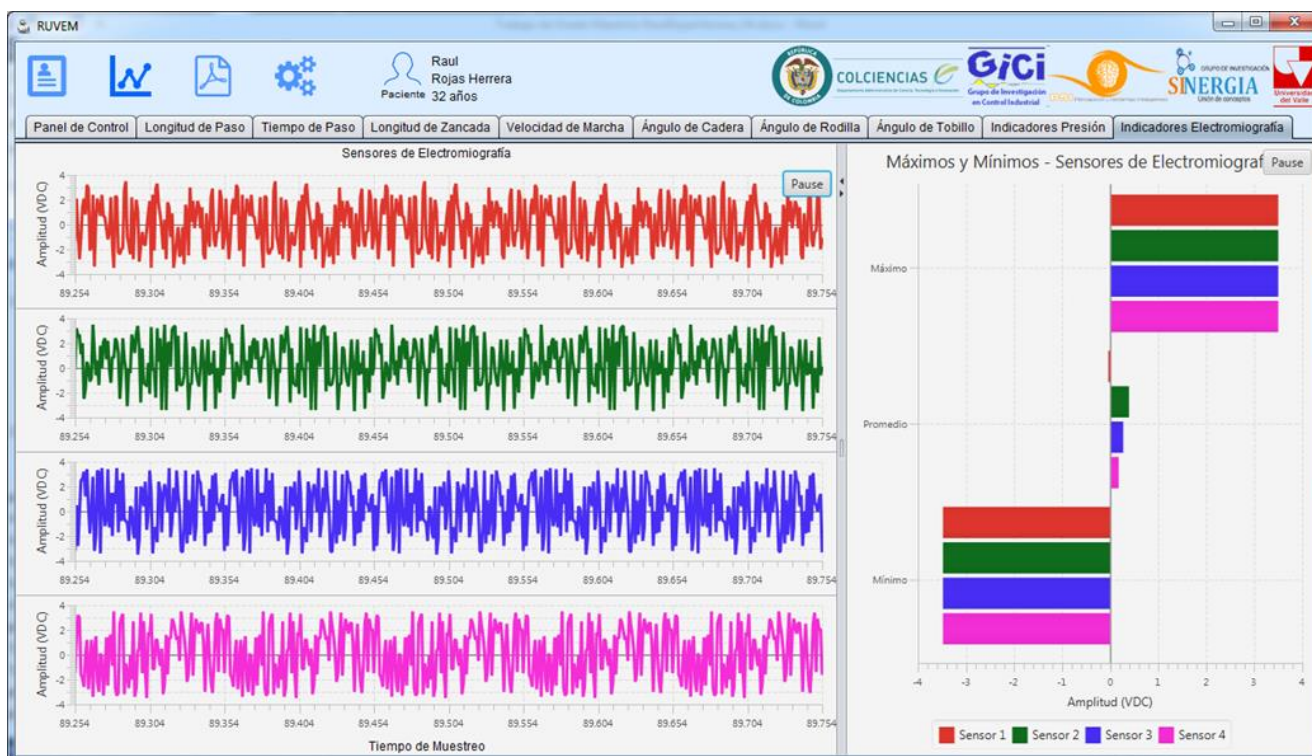


Figura 3.44: Módulo de Terapia - Indicadores de Electromiografía

3.4.3 Módulo de Reportes

El módulo de reportes permite generar en formato PDF y HL7 FHIR la información de las sesiones de marcha de un paciente. En la grilla que se visualiza en la Figura 3.45 se puede ver el listado de sesiones de marcha que ha realizado un paciente con el exoesqueleto previamente. También hay tres botones que permiten adicionar registros de sesiones de marcha para la generación de un reporte, pudiendo agregar hasta diez registros; un botón para recargar la grilla en caso de haber terminado una sesión e inmediatamente dirigirse al módulo de reportes; y finalmente un botón para eliminar un registro de sesión de marcha en caso de haberse tenido que repetir o ser objeto de prueba.

En la parte inferior se puede ver una grilla vacía en la cual se adicionan los registros de las sesiones de marcha que se desea poner en el reporte. De los registros adicionados, el más reciente será en el que se basa el reporte y los demás serán parte del comparativo histórico dentro del reporte. La grilla del reporte contiene 3 botones, el primero permite limpiar la grilla para generar un nuevo reporte y los dos botones siguientes permiten la generación en formato PDF o HL7 FHIR.

Reportes Paciente

Sesiones de Marcha del Paciente

Identificador	Fecha Registro	Duración (s)	Cantidad de Pasos	Longitud de Fémur (m)	Longitud de Tibia (m)	Estatura (m)	Peso (Kg)	Estado Exo
18	12/10/2016	4	2	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
17	12/10/2016	9	5	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
15	11/10/2016	18	9	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
11	16/06/2016	47	24	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
10	31/05/2016	49	25	0.38	0.39	1.75	78	ACTIVO
9	31/05/2016	22	11	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
8	31/05/2016	4095	2047	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
6	31/05/2016	41	21	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
5	31/05/2016	54	27	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
4	30/05/2016	44	22	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
2	29/05/2016	56	28	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO

Sesiones del Reporte (Máximo 10 registros)

Identificador	Fecha Registro	Duración (s)	Cantidad de Pasos	Longitud de Fémur (m)	Longitud de Tibia (m)	Estatura (m)	Peso (Kg)	Estado Exo
---------------	----------------	--------------	-------------------	-----------------------	-----------------------	--------------	-----------	------------

Figura 3.45: Módulo de Reportes

En la Figura 3.46 se visualiza la adición de 4 registros de sesiones de marcha para la generación de un reporte. En este caso, el primer registro que corresponde al más reciente de los adicionados, será en el que se basa el reporte, los demás serán necesarios para realizar un comparativo histórico respecto al primero, pudiendo presentar el comportamiento de las sesiones de marcha del paciente respecto al tiempo.

Reportes Paciente

Sesiones de Marcha del Paciente

Identificador	Fecha Registro	Duración (s)	Cantidad de Pasos	Longitud de Fémur (m)	Longitud de Tibia (m)	Estatura (m)	Peso (Kg)	Estado Exo
18	12/10/2016	4	2	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
17	12/10/2016	9	5	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
15	11/10/2016	18	9	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
11	16/06/2016	47	24	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
10	31/05/2016	49	25	0.38	0.39	1.75	78	ACTIVO
9	31/05/2016	22	11	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
8	31/05/2016	4095	2047	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
6	31/05/2016	41	21	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
5	31/05/2016	54	27	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
4	30/05/2016	44	22	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
2	29/05/2016	56	28	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO

Sesiones del Reporte (Máximo 10 registros)

Identificador	Fecha Registro	Duración (s)	Cantidad de Pasos	Longitud de Fémur (m)	Longitud de Tibia (m)	Estatura (m)	Peso (Kg)	Estado Exo
18	12/10/2016	4	2	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
17	12/10/2016	9	5	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
15	11/10/2016	18	9	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
11	16/06/2016	47	24	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
10	31/05/2016	49	25	0.38	0.39	1.75	78	ACTIVO
9	31/05/2016	22	11	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
8	31/05/2016	4095	2047	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO
6	31/05/2016	41	21	0.38	0.39	1.75	78	PASIVO

Figura 3.46: Módulo de Reportes - Generación de un Reporte

Los reportes se componen de 3 secciones, la primera contiene los datos del paciente, como se muestra en la Figura 3.47; la segunda sección contiene el reporte de la marcha, en la cual se muestra la cantidad de pasos, distancia recorrida, velocidad máxima, mínima y promedio; una gráfica de barras con los datos de máximo, promedio y mínimo para cada lado en los datos espacio-temporales y una gráfica de línea para cada dato cinemático presentando una muestra de 5 pasos. Finalmente, se muestra una sección con información histórica de las sesiones de marcha del paciente. Esto se hace usando gráficas de barras que muestran el valor mínimo, promedio y máximo de cada dato espacio-temporal, ubicados por fecha comparándose con la última sesión de marcha. Una muestra del reporte en formato PDF se adjunta en el Anexo A.

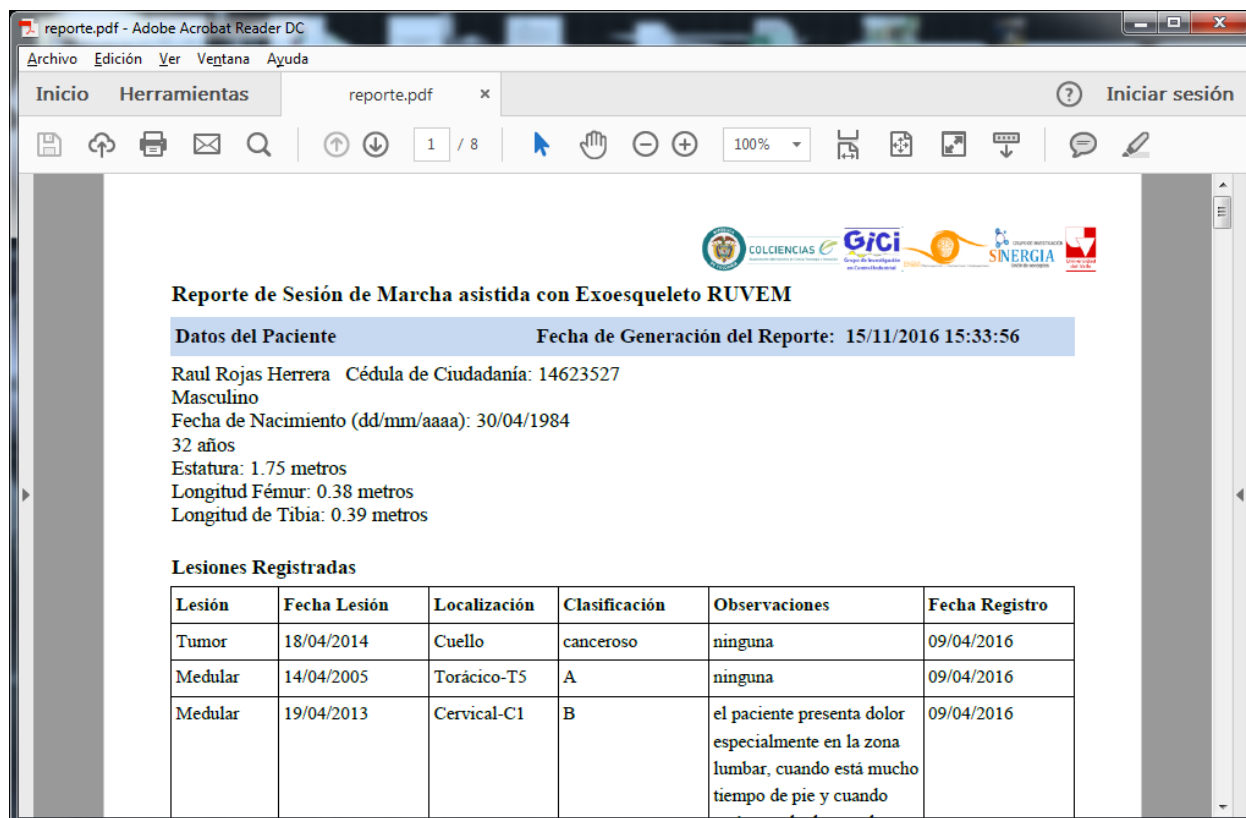


Figura 3.47: Reporte en Formato PDF

El reporte en formato HL7 FHIR tiene el mismo contenido que el reporte generado en formato PDF, sin embargo, la generación de este reporte se hace en formato JSON como se muestra en la Figura 3.48. Para la construcción de este reporte se utilizó el componente DiagnosticReport, el cual se usa para reportes generales, y para cada sección del reporte se utilizó el componente Observation que almacena la información internamente en un componente DIV HTML, dando así una estructura interna al reporte que permita reconstruirlo en cualquier sistema que soporte el mismo estándar [23].

Para la implementación del estándar HL7 FHIR en lenguaje Java se utilizó la librería HAPI FHIR, que facilitó la abstracción de los componentes DiagnosticReport y Observation, y su respectiva conversión a un formato JSON que cumpla con el estándar [14]. Una muestra del reporte en formato JSON se adjunta en el Anexo B.

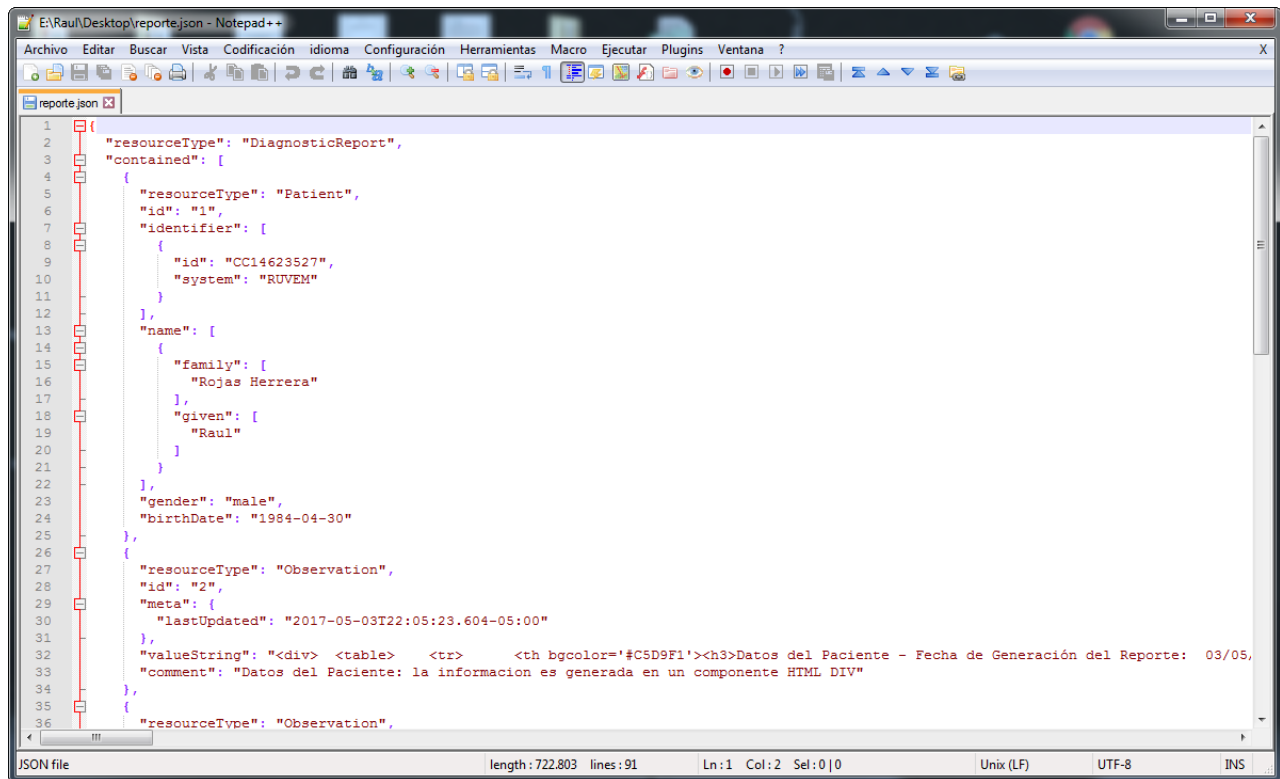


Figura 3.48: Reporte HL7 FHIR en formato JSON

3.4.4 Módulo de Configuración

El módulo de configuración permite la administración de diferentes parámetros y variables del sistema, tales como parámetros de trayectorias de marcha, valores normales para las gráficas espacio-temporales, parámetros de conexión con el exoesqueleto, entre otras, con el fin de permitir una mayor flexibilidad del sistema. Estas variables y parámetros son útiles para el correcto funcionamiento del sistema, y en las figuras siguientes se detallarán cada una de ellas. Es importante resaltar que por seguridad no es posible realizar cambios en la configuración mientras exista un paciente seleccionado. En la Figura 3.49 se puede observar los registros de las trayectorias que se han cargado para utilizarse en las sesiones de marcha con los pacientes. Estas trayectorias pueden ser cargadas y eliminadas a través de los controles que contiene la funcionalidad, así mismo es posible visualizar el detalle de cada una de ellas.

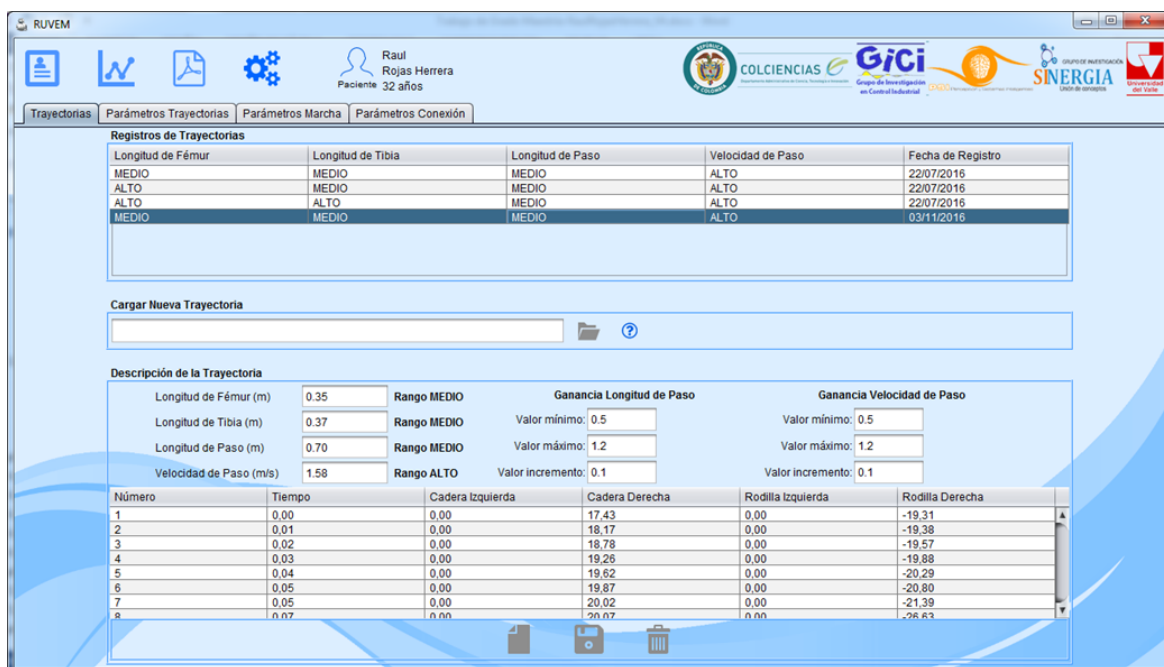


Figura 3.49: Módulo de Configuración - Trayectorias

Las trayectorias contienen valores continuos para los datos de longitud de fémur, tibia, paso y velocidad de marcha, sin embargo para facilitar la visualización y comprensión de estos datos, se realizó una discretización usando los valores ALTO, MEDIO Y BAJO. En la Figura 3.50 se muestra cuatro componentes personalizados tipo slider que permiten definir el rango al cual pertenece cada valor discreto para cada variable.

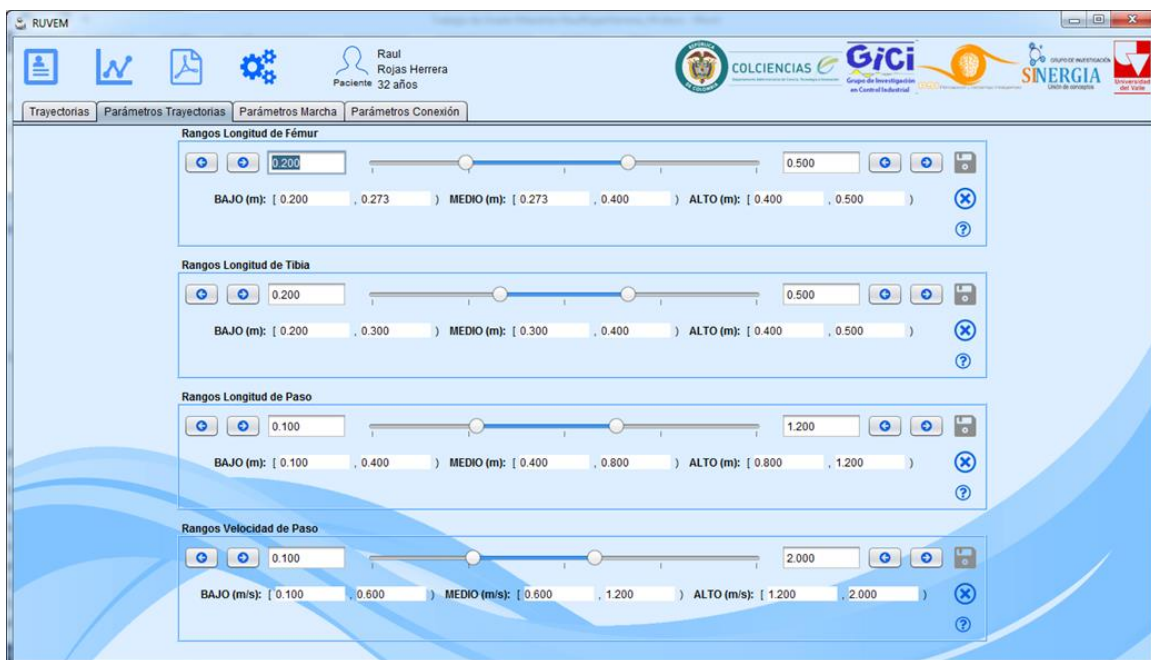


Figura 3.50: Módulo de Configuración - Parámetros de Trayectorias

En la Figura 3.51 se visualizan los controles que permiten administrar diferentes parámetros de la marcha, entre ellos los límites de los sensores de presión. Estos dos valores nos ayudan a identificar cuando el paciente ha dado un paso. Actualmente se usan los sensores número 4 izquierdo y 4 derecho para identificar cuando el paciente ha levantado o sentado el pie y de esta manera poder identificar que se ha dado un paso. Por otra parte los valores normales hacen referencia a los rangos de los datos que se grafican en las curvas de los datos espacio-temporales como valores de referencia.

Límites Sensores de Presión		Valores Normales para Longitud de Paso (m)	
Límite Superior:	3.0 Ej: 6.0	Normal Izquierdo:	0.6 Ej: 0.6
Límite Inferior:	1.0 Ej: 1.0	Normal Derecho:	0.7 Ej: 0.7
Valores Normales para Tiempo de Paso (ms)		Valores Normales para Longitud de Zancada (m)	
Normal Izquierdo:	800.0 Ej: 505	Normal Izquierdo:	0.9 Ej: 0.9
Normal Derecho:	900.0 Ej: 490	Normal Derecho:	1.0 Ej: 1.0
Valores Normales para Velocidad de la Marcha (m/s)			
Normal Izquierdo:	0.7 Ej: 0.7		
Normal Derecho:	0.6 Ej: 0.6		

Figura 3.51: Módulo de Configuración - Parámetros de Marcha

Los controles que se muestran en la Figura 3.52 permiten modificar la dirección IP y puerto en el que escucha el exoesqueleto dentro de la red LAN. Adicionalmente se puede cambiar los datos del buffer de lectura y escritura de acuerdo al tamaño de la información que se envía y recibe del exoesqueleto en cada trama. También podemos cambiar el tiempo de muestreo permitiendo optimizar la lectura de los datos y permitir una mayor sincronización con el tiempo de muestreo del exoesqueleto.

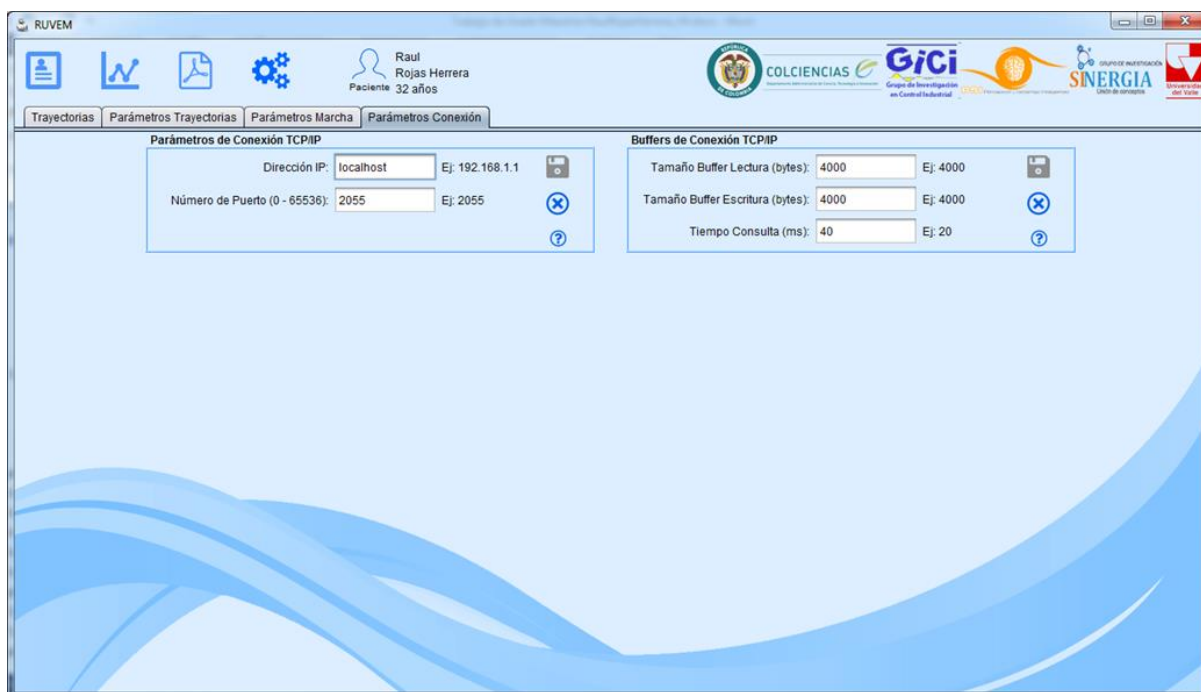


Figura 3.52: Módulo de Configuración - Parámetros de Conexión

3.5 Observaciones Finales

En este capítulo se logró demostrar que el modelo propuesto para el sistema, satisface las necesidades requeridas para la administración de la información obtenida del paciente durante la caracterización y las sesiones de marcha con el exoesqueleto. Incluyendo diferentes módulos a saber: módulo de hoja clínica, en el que se registra la información característica del paciente; el módulo de terapia, en donde se intercambia información con el exoesqueleto y se presenta en gráficos en tiempo real; el módulo de reportes que permite recuperar en formato PDF y HL7 la información de las sesiones de marcha del paciente; finalmente el módulo de configuración en el que se administran diferentes variables de control del sistema.

Por otra parte, la base de datos que representa la base del sistema, permite almacenar y recuperar de manera adecuada la información. La estructuración del código fuente permite la reutilización de componentes, y la creación de nuevas funcionalidades impactando únicamente los componentes responsables de la solución, cumpliendo con el principio de alta cohesión y bajo acoplamiento entre los componentes del sistema.

En cuanto a los componentes de interfaz gráfica de usuario, se consiguió construir interfaces poco saturadas de objetos, las funcionalidades del mismo tipo se agrupan en módulos con el fin de hacer más intuitivo el uso de la aplicación, y se buscó mantener los colores de los objetos dentro de la aplicación en una misma tonalidad, evitando así saturación de colores que sean molestos a la vista.



Capítulo 4 PRUEBAS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se hace un resumen de las pruebas funcionales realizadas a cada módulo del software, las cuales fueron ejecutadas usando las técnicas de caja negra más adecuadas de acuerdo a la funcionalidad y sus restricciones, tales como partición de equivalencias, análisis de valor límite y basadas en la experiencia. Adicionalmente, se muestra un resumen de las pruebas realizadas integrando el software con el exoesqueleto, y la validación de los reportes generados bajo un estándar. Finalmente, se presentan las conclusiones acerca de las pruebas ejecutadas y sus resultados.

4.1. Introducción

Las pruebas de calidad del software son una etapa muy importante para garantizar el adecuado funcionamiento de una aplicación, aún más hoy en día que el software está inmerso en nuestras vidas diarias, interviniendo en actividades y procesos que van desde lo más simple como el control de un electrodoméstico, hasta aplicaciones que controlan procesos nucleares, donde un error puede comprometer la vida de muchas personas.

Para garantizar un correcto funcionamiento del software desarrollado, se ejecutaron diferentes pruebas con diseños basados en técnicas de caja negra sobre las funcionalidades, entre ellas las técnicas partición de equivalencias, análisis de valor límite y basadas en la experiencia, en busca de evidenciar cualquier defecto que no haya sido detectado en el proceso de desarrollo, procediendo así con su respectiva corrección.

Por otra parte, se realizaron pruebas de interoperabilidad del software con el módulo en LabView que comunica con la instrumentación del exoesqueleto. Estas pruebas consistieron en realizar la carga de trayectorias y el control del exoesqueleto desde el módulo de terapia del software. Las pruebas se ejecutaron con el acompañamiento de los ingenieros electrónicos que se encargan de la instrumentación del exoesqueleto, y del desarrollo del módulo en LabView, esto con el fin de evaluar la integridad de los datos enviados y recibidos, así como la correcta ejecución en el exoesqueleto de los comandos enviados desde el software. El detalle sobre el diseño, ejecución, descripción y clasificación de no conformidades y resultado de las pruebas funcionales y no funcionales se encuentra en el Anexo C, y un registro en video del comportamiento del sistema software-exoesqueleto integrado se encuentra en el Anexo D.

4.2. Pruebas Funcionales Ciclo I

Para la ejecución de las pruebas funcionales se desarrolló el respectivo plan de pruebas que se relaciona en este documento en el Anexo C. El plan de pruebas se compone principalmente de: un cronograma en el cual se describen las actividades; fechas de ejecución y analistas relacionados a cada actividad; los escenarios de prueba, que son las fichas técnicas de los ambientes requeridos para la correcta ejecución de las diferentes pruebas; la matriz de descomposición funcional, donde se registran los requerimientos funcionales que dieron los lineamientos del desarrollo del software; el listado de requerimientos no funcionales, que permiten el aseguramiento de los atributos de calidad del sistema; el diseño de las pruebas, el cual es un listado con los casos de prueba funcionales y no funcionales que se construye basado en los requisitos; finalmente, la presentación de los resultados obtenidos en la ejecución de las diferentes pruebas.

En el plan de pruebas se registran 29 requerimientos funcionales, los cuales dieron lugar a 295 casos de pruebas agrupados en 53 suites de pruebas. Como resultado de la ejecución del ciclo I de las pruebas funcionales, se identificaron 5 pruebas fallidas de las 295 ejecutadas. Estas 5 pruebas que presentaron No Conformidades (NC) impactaron 4 requerimientos funcionales, tal como se muestra en la Tabla 4.1, en la cual se relacionan los requerimientos probados, la cantidad de pruebas realizadas por requerimiento y las No Conformidades identificadas de acuerdo a su tipo. Un mayor detalle de estos resultados se puede consultar en el Anexo C.

Tabla 4.1: Matriz de clasificación de No Conformidades

Requerimientos	Total NC bloqueantes	Total NC funcionales	Total NC presentación	Total requerimientos de pruebas diseñados	Total requerimientos de pruebas ejecutados	Total requerimientos de pruebas con fallos	Total requerimientos de pruebas ok	Total requerimientos de pruebas por ejecutar
MODHOJAC-REQ-001	0	2	0	47	47	2	45	0
MODHOJAC-REQ-002	0	0	0	28	28	0	28	0
MODHOJAC-REQ-003	0	0	0	11	11	0	11	0
MODHOJAC-REQ-004	0	1	0	6	6	1	5	0
MODHOJAC-REQ-005	0	0	0	2	2	0	2	0
MODHOJAC-REQ-006	0	0	0	7	7	0	7	0
MODTERAP-REQ-007	0	0	0	2	2	0	2	0
MODTERAP-REQ-009	0	0	0	10	10	0	10	0
MODTERAP-REQ-010	0	0	0	2	2	0	2	0

MODTERAP-REQ-011	0	0	0	5	5	0	5	0
MODTERAP-REQ-012	0	1	0	5	5	1	4	0
MODTERAP-REQ-013	0	0	0	6	6	0	6	0
MODTERAP-REQ-014	0	0	0	6	6	0	6	0
MODTERAP-REQ-015	0	0	0	6	6	0	6	0
MODTERAP-REQ-016	0	0	0	6	6	0	6	0
MODTERAP-REQ-017	0	0	0	6	6	0	6	0
MODTERAP-REQ-018	0	0	0	6	6	0	6	0
MODTERAP-REQ-019	0	0	0	6	6	0	6	0
MODTERAP-REQ-020	0	0	0	6	6	0	6	0
MODTERAP-REQ-021	0	0	0	5	5	0	5	0
MODREPOR-REQ-022	0	0	0	10	10	0	10	0
MODREPOR-REQ-023	0	0	0	14	14	0	14	0
MODREPOR-REQ-024	0	0	0	3	3	0	3	0
MODREPOR-REQ-025	0	0	0	3	3	0	3	0
MODCONFIG-REQ-026	0	1	0	11	11	1	10	0
MODCONFIG-REQ-027	0	0	0	20	20	0	20	0
MODCONFIG-REQ-028	0	0	0	30	30	0	30	0
MODCONFIG-REQ-029	0	0	0	26	26	0	26	0

En la Tabla 4.2 se relacionan las estadísticas resultantes de acuerdo a la cantidad de pruebas ejecutadas y las No Conformidades identificadas.

Tabla 4.2: Estadísticas resultado de pruebas funcionales Ciclo I

Nombre	Descripción	Forma de Calculo	Resultado	Resultado esperado	Resultado cualitativo
Correctitud	Porcentaje de las funcionalidades evaluadas que se comportan de acuerdo al resultado esperado.	$1 - A/B$ A = funcionalidades con no conformidades B = Total funcionalidades evaluadas	$1-25/29 = 87\%$	90%	Buen resultado en la iteración 1, el 87% de las funcionalidades se comportan de acuerdo a lo esperado.
Compleitud en desarrollo	Porcentaje de funcionalidades implementadas y listas para ser validadas	$1 - A/B$ A = funcionalidades faltantes por realizar B = Total funcionalidades evaluadas	$1-0/29 = 100\%$	100%	El desarrollo está completo
Densidad de NC	Razón de No conformidades identificadas por	A/B	$5/29 = 17.2\%$	25%	Buen resultado, se presenta un índice del 17.2%

	requerimiento ejecutado	A= No conformidades B= Requerimientos ejecutados			de no conformidades por requerimiento
Confiabilidad	Porcentaje de confiabilidad del producto basado en la densidad de NC	$C = (1 - \text{Densidad NC}) * 100$	83%	80%	Buen resultado, el producto presenta un 83% de confiabilidad en la primera iteración.

La correctitud permite evidenciar el porcentaje de las funcionalidades que fueron probadas y en las que se descartaron No Conformidades. Como se puede observar en la Tabla 4.3 el porcentaje esperado era del 90%, lo cual es un porcentaje bastante ambicioso para el primer ciclo de pruebas, llegando a cumplir con el 87% de las funcionalidades evaluadas y que se comportan de acuerdo a lo esperado. La completitud en el desarrollo muestra el porcentaje de funcionalidades implementadas al momento de ejecutar las pruebas, teniendo para este caso el total de los requisitos implementados.

La densidad de no conformidades es el porcentaje de requerimientos en los cuales se identificaron no conformidades, lo cual es un dato poco ajustado a la realidad, puesto que algunos requerimientos son más grandes que otros, y por lo tanto contemplan un mayor número de casos de prueba, para este caso se tiene un 17.2% de un tope del 25% establecido.

Finalmente, la confiabilidad es un dato basado en la densidad de no conformidades, y significa el porcentaje de confiabilidad que tiene el software, dada la cantidad de requerimientos que fueron impactados por no conformidades, para este índice se estableció un porcentaje del 80% en el primer ciclo de pruebas, cumpliendo en un 83% lo que significó un resultado superior al esperado. El detalle de estas pruebas se encuentra en la sección 11. Ejecución y Resultados de Pruebas Funcionales, del documento de plan de pruebas del software relacionado en el Anexo C.

4.3. Pruebas Funcionales Ciclo II

Luego de corregidas las No Conformidades identificadas en el Ciclo I de pruebas, en el Ciclo II se ejecuta unas pruebas de humo sobre las funcionalidades que se probaron en el Ciclo I y que su resultado fue correcto. Por otra parte, para las funcionalidades a las que se le identificaron No Conformidades, se realizan las pruebas de manera minuciosa de acuerdo al diseño de los casos de prueba en los cuales fallaron. Esto con el objetivo de probar la solución de las mismas.

En la Tabla 4.3 se relaciona el resultado en cifras de la ejecución del Ciclo II de las pruebas funcionales, en la cual se evidencia que en el segundo ciclo se logró corregir todas las No Conformidades identificadas en el Ciclo I, terminando así las pruebas funcionales con los

resultados esperados. El detalle de la ejecución de las pruebas, se puede consultar en la sección 11. Ejecución y Resultados de Pruebas Funcionales, del documento de plan de pruebas relacionado en el Anexo C.

Tabla 4.3: Estadísticas resultado de pruebas funcionales Ciclo II

Nombre	Descripción	Forma de Calculo	Resultado	Resultado esperado	Resultado cualitativo
Correctitud	Porcentaje de las funcionalidades evaluadas que se comportan de acuerdo al resultado esperado.	$1 - A/B$ A = funcionalidades con no conformidades B = Total funcionalidades evaluadas	$1 - 0/29 = 100\%$	100%	Buen resultado en el Ciclo II, el 100% de las funcionalidades se comportan de acuerdo a lo esperado.
Compleitud en desarrollo	Porcentaje de funcionalidades implementadas y listas para ser validadas	$1 - A/B$ A = funcionalidades faltantes por realizar B = Total funcionalidades evaluadas	$1 - 0/29 = 100\%$	100%	El desarrollo está completo
Densidad de NC	Razón de No conformidades identificadas por requerimiento ejecutado	A/B A= No conformidades B= Requerimientos ejecutados	$0/29 = 0\%$	0%	Buen resultado, se presenta un índice del 0% de no conformidades por requerimiento
Confiabilidad	Porcentaje de confiabilidad del producto basado en la densidad de NC	$C = (1 - \text{Densidad NC}) * 100$	100%	100%	Buen resultado, el producto presenta un 100% de confiabilidad en la segunda iteración.

Como se puede observar en la Tabla 4.3 los porcentajes de los índices para los resultados esperados se ajustaron al 100%, esto debido a que ya se había llevado a cabo la ejecución de un ciclo de pruebas, donde se identificaron algunas No Conformidades, que luego de ser resueltas se debería reducir la posibilidad de encontrar No Conformidades nuevas. Por consiguiente, se puede visualizar que los resultados se dieron de acuerdo a lo esperado. El detalle de las pruebas se amplía en el documento de plan de pruebas adjunto como Anexo C.

4.4. Pruebas No Funcionales Ciclo I

El requerimiento no funcional más relevante en el desarrollo del actual proyecto de software es el de Interoperabilidad, teniendo en cuenta que el software debe intercambiar información con otros sistemas que pueden estar creados en diferentes lenguajes de programación e instalados en sistemas operativos distintos.

En la prueba de interoperabilidad se evaluó que: el software llevara a cabo su comportamiento de manera independiente a las aplicaciones con las que interactúa; que el intercambio de la información se llevara a cabo siguiendo un protocolo previamente establecido; que el intercambio de datos no interrumpiera el correcto comportamiento de cada sistema; y que los datos que se intercambian no sean modificados en la transmisión. En la ejecución de la prueba se realizó la carga de trayectorias y el control del exoesqueleto desde el módulo de terapia del software, con el acompañamiento de los ingenieros electrónicos que se encargaron de la instrumentación del exoesqueleto, y del desarrollo del módulo en LabView, esto con el fin de evaluar la integridad de los datos enviados y recibidos, así como la correcta ejecución en el exoesqueleto de los comandos enviados desde el software. El detalle de las pruebas se encuentra la sección 12. Ejecución y Resultados de Pruebas No Funcionales, en el documento del Anexo C, y un registro en video del comportamiento del sistema software-exoesqueleto integrado se encuentra en el Anexo D.

Como resultado de la evaluación, se evidenció que el software presenta un comportamiento correcto de acuerdo a lo esperado para el requerimiento no funcional de interoperabilidad.

4.5. Conclusiones

En este capítulo se presentaron los resultados de la planeación, diseño y ejecución de las pruebas funcionales y no funcionales, evidenciando la importancia de la ejecución de un plan de pruebas, el cual permite identificar las No Conformidades que se generaron durante el proceso de desarrollo del software.

En el proceso de pruebas efectuado se utilizaron las técnicas de partición de equivalencias, análisis de valor límite y basadas en la experiencia. Para el diseño de los casos de prueba; las cuales permitieron identificar 295 pruebas diferentes, agrupadas en 53 casos de prueba para los 29 requerimientos funcionales que se registraron en la matriz de descomposición funcional, que puede ser consultada en el Anexo C. Se llevó a cabo la ejecución de 2 ciclos de prueba, teniendo como resultado del ciclo I la identificación de 5 pruebas fallidas de las 295 ejecutadas. Estas 5 pruebas que presentaron No Conformidades, impactaban 4 requerimientos funcionales, finalmente se hicieron las correcciones sobre el software y se procedió con la ejecución del ciclo II de las pruebas, alcanzando un 100% de correctitud en el software, índice

que mide el porcentaje de funcionalidades evaluadas que se comportan de acuerdo a lo esperado.

Adicionalmente, se tenía un caso de prueba no funcional para el atributo de interoperabilidad, cuyo objetivo era el de evaluar si el software llevaba a cabo un intercambio de información con el exoesqueleto de manera correcta e ininterrumpida. Entonces, siguiendo el protocolo de comunicación previamente establecido, y que los datos que se intercambiaban no fueran modificados en la transmisión. Para la ejecución de la prueba se realizó la carga de trayectorias y el control del exoesqueleto desde el módulo de terapia del software. Lo cual evidenció la correcta ejecución en el exoesqueleto de los comandos enviados, concluyendo de esta manera que la prueba fue exitosa. El detalle de las pruebas se registró en el plan de pruebas relacionado en el Anexo C, y en el Anexo D un registro en video de la interacción del sistema completo software-exoesqueleto.

Cabe resaltar que las pruebas son una etapa importante en la ingeniería del software, en la que se le agrega calidad al software y por consiguiente mayor satisfacción al cliente, por lo tanto es indispensable que se lleve a cabo cubriendo todos los requerimientos funcionales, y siguiendo una metodología y unas técnicas que permitan maximizar los beneficios de la inversión de tiempo y esfuerzo que requiere el diseño y ejecución de un buen plan de pruebas.



Capítulo 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. Conclusiones

El propósito de este proyecto era implementar un sistema de información que apoyara en la administración y análisis de los datos adquiridos de un exoesqueleto de marcha asistida [2]. Para llevar a cabo este objetivo se elaboró un estado del arte de los aplicativos software de diferentes exoesqueletos, que puede ser consultado en la sección 2.1, concluyendo así, según esta investigación, que era necesario llevar a cabo el desarrollo del software a la medida, dado que cada dispositivo robótico tiene una instrumentación propia que dificulta la creación de un software genérico. Por lo tanto, para la creación del sistema de información se llevó a cabo el proceso de desarrollo de software desde cero, cumpliendo con cada una de las etapas que comprenden el análisis y especificación de los requisitos, el diseño, la implementación, pruebas y finalmente el despliegue y el mantenimiento.

Dentro de los requisitos establecidos por el equipo del proyecto, se tenía la creación de un módulo de hoja clínica, el cual permitiría registrar los datos del paciente, sus lesiones, evaluaciones de alteraciones en la sensibilidad, evaluaciones de movilidad articular y de debilidad muscular. Un módulo de terapia, encargado de la comunicación con el exoesqueleto, con la responsabilidad de enviarle las trayectorias y los comando de estado, así como recibir la información generada y presentarla en las gráficas dispuestas para tal fin. Un módulo de reportes que genere en PDF y HL7 [13] la información de las sesiones de marcha del paciente con el exoesqueleto. Finalmente, un módulo para administrar los parámetros que son susceptibles de cambio en el sistema.

El proceso de desarrollo se ejecutó bajo un marco de trabajo ágil, usando el marco de trabajo Scrum [12] como referencia para la recolección de los requisitos y la ejecución de los objetivos en periodos de 2 semanas, lo que facilitó el trabajo de la especificación del software. Dado que en este caso los clientes fueron los directivos del proyecto, incluyendo profesionales en ingeniería electrónica, fisioterapia e ingeniería de sistemas, teniendo así que satisfacer las necesidades de diferentes personas con enfoques distintos. En este proceso se llevó a cabo un desarrollo evolutivo del software, realizando validaciones y ajustes constantemente, hasta conseguir la versión deseada por cada uno de los actores involucrados en la especificación.

El sistema fue desarrollado usando software libre aprovechando ventajas como la reducción de costos, tener una comunidad de desarrolladores amplia y activa que aporta soluciones a los problemas presentados, el uso de software ya probado por muchos desarrolladores, entre otras. Para la base de datos se usó el motor PostgreSQL [7], que tiene una muy buena reputación en el área del software por su robustez y facilidad de administración; como lenguaje de programación se utilizó Java [8], el cual es uno de los lenguajes más usados y potentes a nivel mundial; y para el diseño de la aplicación se usó el patrón de diseño de 3 capas [10], el cual permite mayor escalabilidad, rendimiento y hace más fácil de entender sus componentes debido a que están lógicamente en capas diferentes.

El proceso de pruebas que se llevó a cabo en el software se ejecutó en 2 ciclos, aplicando 295 pruebas funcionales y una prueba no funcional, que fueron diseñados usando las técnicas partición de equivalencias, análisis de valor límite y basadas en la experiencia. En el primer ciclo de pruebas se identificaron 5 no conformidades que fueron corregidas y probadas en el ciclo II con resultados satisfactorios, alcanzando un índice del 100% en correctitud del software. Lo que indica que todas las funcionalidades evaluadas se comportan de acuerdo a lo esperado. Para la prueba no funcional, se evaluó el atributo de interoperabilidad, intercambiando datos con el exoesqueleto y verificando que respondiera de acuerdo a lo que se esperaba en cada uno de los comandos enviados, logrando un resultado satisfactorio. Todo el diseño, ejecución y resultados de las pruebas se documentaron y se relacionan en el Anexo C y Anexo D.

Finalmente, se puede concluir que se cumplió con los objetivos planteados, ya que se logró diseñar e implementar una aplicación software para la administración y análisis de la información adquirida del exoesqueleto RUVEM, la cual aporta en gran medida a un proyecto ambicioso y con enfoque social. Además, la ejecución de este proyecto me permitió aplicar gran parte del conocimiento adquirido durante la etapa académica de la maestría, logrando poner en práctica conocimientos en arquitectura de software, metodologías de desarrollo de software, fundamentos de bases de datos, pruebas y calidad del software. También, conseguí ampliar nuevos conceptos en electrónica y salud de los cuales tenía una idea vaga al iniciar el proyecto, y poder compartir con un gran equipo de profesionales expertos en su materia que me guiaron a la culminación de este proyecto.

5.2. Trabajos Futuros

Con el fin de mejorar y ampliar las funcionalidades del software desarrollado, así como aprovechar la información que se pueda obtener de un dispositivo como el exoesqueleto de marcha asistida RUVEM, se propone a futuro los siguientes trabajos:

- Realizar pruebas del exoesqueleto con humanos para evaluar desde el software la información generada y poder llevar a cabo los ajustes correspondientes.
- Ampliar la interoperabilidad del sistema vía Web Services, para aprovechar las bondades del estándar HL7 FHIR en el intercambio de información entre sistemas heterogéneos en el entorno clínico.
- Implementar una bodega de datos con la información generada por el exoesqueleto en las sesiones de marcha con pacientes reales, con el fin de centralizar y resumir la gran cantidad de datos que se generan por cada sesión.
- Aplicar técnicas de minería de datos a la información recolectada de los pacientes a través del exoesqueleto, con el fin de explorar nuevo conocimiento asociado a las patologías relacionadas con la marcha en miembros inferiores.



Capítulo 6 REFERENCIAS

- [1]. Chávez Manuel., Rodríguez Felipe y Baradica Asfur. Exoesqueletos para potenciar las capacidades humanas y apoyar la rehabilitación. En: Revista Ingeniería Biomédica. Enero-Junio, 2010. vol. 4, no. 7, p. 63-73.
- [2]. Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Proyecto Marcha asistida con un exoesqueleto, Código: 110652128248 de Colciencias, Contrato No. 462-2012, Director: José Miguel Ramírez Escarpeta.
- [3]. Hocoma. (s.f.). LOKOMAT® - Enhanced Functional Locomotion Therapy. 12 de Noviembre de 2014, de Hocoma Sitio web: <http://www.hocoma.com/products/lokomat/>
- [4]. Henning Schmidt, Jörg Krüger y Stefan Hesse. En: Human Haptic Perception: Basics and Applications. 1 ed. Alemania: Birkhäuser, 2008. p. 501-511.
- [5]. WoodWay. (s.f.). LokoHelp The Way To Walk. 12 de Noviembre de 2014, de WoodWay Sitio web: <http://www.woodway.de/medicaltreadmills/lokohelp.html>
- [6]. Reha Technology AG. (2014). G-EO System. 12 de Noviembre de 2014, de Reha Technology AG Sitio web: <http://www.rehatechnology.com/en/products.html>
- [7]. PostgreSQL. (2014). About. 13 de Noviembre de 2014, de PostgreSQL Sitio web: <http://www.postgresql.org/about/>
- [8]. Oracle. (2014). Java SE at a Glance. 13 de Noviembre de 2014, de Oracle Sitio web: <http://www.oracle.com/technetwork/es/java/javase/overview/index.html>
- [9]. Paul Clements. "A Survey of Architecture Description Languages". Proceedings of the International Workshop on Software Specification and Design, Alemania, 1996.
- [10]. De la Torre, César, Unai Zorrilla, Miguel A. Ramos, y Javier Calvarro. Guía de Arquitectura N-Capas Orientada al Dominio con .NET 4.0. Vol. 1. España: Krasis Press, 2010. 3-100. 1 vols. Web. 15 Nov. 2014.
- [11]. NetBeans IDE. (2013). NetBeans IDE - The Smarter and Faster Way to Code. 15 de Noviembre de 2014, de NetBeans Sitio web: <http://netbeans.org/features/index.html>

- [12]. Alaimo Martin. Introducción a la Agilidad y Scrum. 15 de Noviembre de 2014, de Kleer, Agile Coaching & Training Sitio web: www.kleer.la
- [13]. Health Level Seven. (2014). About HL7. 16 de Noviembre de 2014, de Health Level Seven Sitio web: <http://www.hl7.org/about/index.cfm?ref=nav>
- [14]. HAPI-FHIR library. (2014). Open-source implementation of the FHIR specification in Java. 06 de Mayo de 2016, de HAPI FHIR Sitio web: <http://hapifhir.io/>
- [15]. Pietrusinski M., Unluhisarcikli O., Cajigas I., Bonato P. and Mavroidis C., "Design of Human – Machine Interface and Altering of Pelvic Obliquity with RGR Trainer". Memorias de: 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR 2011), June 29-July 1, 2011, Zurich, Switzerland. P. 1-6.
- [16]. Northeastern University. (2011). Robotic Gait Rehabilitation (RGR) Trainer. 16 de Noviembre de 2014, de Northeastern University Sitio web: <http://www.robots.neu.edu/pelvic/Index.htm>
- [17]. Kapandji, A. I., Judet, T., & Lacombe, M. T. (2010). Fisiología articular: Esquemas comentados de mecánica humana (6th ed., Vol. 2). Madrid: Editorial Médica Panamericana.
- [18]. University of Twente. (2016). LOPES project (LOwer-extremity Powered ExoSkeleton). 14 de Mayo de 2016, de University of Twente Sitio web: <https://www.utwente.nl/ctw/bw/research/projects/lopes/index.html>
- [19]. J. F. Veneman, R. Kruidhof, E. E. G. Hekman, R. Ekkelenkamp, E. H. F. Van Asseldonk and H. van der Kooij, "Design and Evaluation of the LOPES Exoskeleton Robot for Interactive Gait Rehabilitation," in IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol. 15, no. 3, pp. 379-386, Sept. 2007.
- [20]. R. Ekkelenkamp, J. Veneman and H. van der Kooij, "LOPES: a lower extremity powered exoskeleton," Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, 2007, pp. 3132-3133.
- [21]. J. Meuleman, E. van Asseldonk, G. van Oort, H. Rietman and H. van der Kooij, "LOPES II—Design and Evaluation of an Admittance Controlled Gait Training Robot With Shadow-Leg Approach," in IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol. 24, no. 3, pp. 352-363, March 2016.
- [22]. Ph. Kruchten, "The 4+1 View Model of Architecture," IEEE Software, vol. 12 (6), pp. 45-50, 1995.

- [23]. Health Level Seven - Fast Healthcare Interoperability Resources (HL7 FHIR) (2017). Welcome to FHIR®. 06 de Mayo de 2016, de Health Level Seven. Sitio web: <https://www.hl7.org/fhir/>
- [24]. Información general de TCP/IP (2005). Soporte Cisco. 07 de Junio de 2017, de Cisco. Sitio web: http://www.cisco.com/c/es_mx/support/docs/ip/routing-information-protocol-rip/13769-5.html
- [25]. ¿Qué está incluido con LabVIEW? (2017). LabVIEW. 07 de Junio de 2017, de National Instruments. Sitio web: <http://www.ni.com/white-paper/53642/es/>
- [26]. Single-Board RIO (2017). ¿Qué es Single-Board RIO? 07 de Junio de 2017, de National Instruments. Sitio web: <http://www.ni.com/singleboard/whatis/esa/>
- [27]. About Data Visualization (2017). Introduction to Data Visualization: About Data Visualization. 07 de Junio de 2017, de Duke University. Sitio web: <http://guides.library.duke.edu/datavis/>



Capítulo 7 ANEXOS

- Anexo A** Muestra de reporte en formato PDF. Archivo “Reporte.pdf”
- Anexo B** Muestra de reporte en formato HL7 FHIR. Archivo “Reporte.json”
- Anexo C** Plan de pruebas del Software. Archivo “PlanDePruebasSoftwareRUVEM.pdf”
- Anexo D** Video de pruebas de interoperabilidad. Archivo “PruebaInteroperabilidad.mp4”
- Anexo E** Manual de Usuario. Archivo “ManualDeUsuarioRUVEM.pdf”
- Anexo F** Código fuente del software. Archivo “CodigoFuenteRUVEM.zip”
- Anexo G** Instaladores del software. Archivo “InstaladoresRUVEM.zip”