

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



DISEÑO DE UN SISTEMA DE PRESCRIPCIÓN AUTOMATIZADA PARA LA
REHABILITACIÓN DE FRACTURA DE TOBILLO

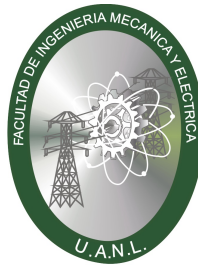
POR

M.C. BERENICE COTRI MELECEZ

EN OPCIÓN AL GRADO DE
DOCTORADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

NOVIEMBRE 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



DISEÑO DE UN SISTEMA DE PRESCRIPCIÓN AUTOMATIZADA PARA LA
REHABILITACIÓN DE FRACTURA DE TOBILLO

POR

M.C. BERENICE COTRI MELECEZ

EN OPCIÓN AL GRADO DE
DOCTORADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTORA DE TESIS
DRA. GRISELDA QUIROZ COMPEÁN

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO, NOVIEMBRE 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la tesis “Diseño de un sistema de prescripción automatizada para la rehabilitación de fractura de tobillo”, realizada por la estudiante Berenice Cotri Melecez, con número de matrícula 1940808, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Doctorado en Ingeniería Eléctrica.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dra. Griselda Quiroz Compeán
Directora

Dr. Luis Martín Torres Treviño
Revisor

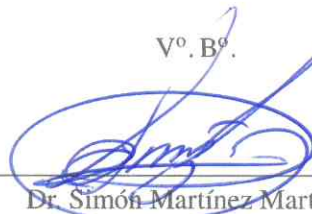
Dr. Juan Ángel Rodríguez Liñán
Revisor

Dr. Erick de Jesús Ordaz Rivas
Revisor

Dra. Dulce Citlalli Martínez Peón
Revisora

Dr. Luis Humberto Rodríguez Alfaro
Revisor

Vº. Bº.



Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución	190001
Programa	514601
Acta núm.	365

Ciudad Universitaria, a 18 de junio de 2025.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia, a mi esposo J. Raymundo por su apoyo incondicional en todos mis proyectos de vida, a mis hijos Raymundo y Belen por traer alegría a mi vida, que me hacen ser una mejor persona y valorar cada instante, agradezco a mis padres que me inculcaron los valores que me formaron como la persona que soy.

Un agradecimiento especial a mi asesora de tesis la Dra. Griselda Quiroz Compeán por su guía, enseñanza y motivación, al Dr. Luis Torres Treviño y al Dr. Luis Ángel Rodríguez Liñán, miembros del Cuerpo Académico de Tecnología e Innovación en Mecatrónica (CATIM) por su valiosa contribución y apoyo en este proyecto. Agradezco al Dr. Demófilo Maldonado Cortez y al Dr. Benito Flores Juarez por brindarme la oportunidad de crecer como profesionista y extendiendo mi agradecimiento a la Universidad de Monterrey por el apoyo financiero brindado para la realización de mis estudios de posgrado.

*A mi esposo,
por estar a mi lado siempre ...*

Índice general

Abstract	7
Resumen	8
1. Introducción	9
1.1. Motivación	9
1.2. Antecedentes	11
1.2.1. Rehabilitación convencional de fractura de tobillo	12
1.2.2. Avances en la automatización de la terapia de rehabilitación física	15
1.2.3. Automatización de diagnósticos en medicina	20
1.3. Planteamiento del problema	24
1.4. Hipótesis	25
1.5. Objetivos	25
1.5.1. Objetivo general	25
1.5.2. Objetivos específicos	25
1.6. Contribución	26
1.7. Lista de publicaciones	26
1.8. Organización de la tesis	27
2. Metodología	28
2.1. Marco teórico	28
2.1.1. Anatomía del tobillo	28
2.1.2. Movimientos del tobillo	29
2.1.3. Fractura del tobillo	35

2.1.4. Terapia convencional para la rehabilitación de la fractura del tobillo	39
2.2. Sistema de prescripción asistido por computadora	43
2.2.1. PRF tradicional para fractura de tobillo	44
2.3. Sistema propuesto: prescripción automatizada	47
2.3.1. Base de datos	48
2.3.2. Conocimiento del experto	51
2.3.3. Reglas	53
3. Resultados	56
3.1. Recolección de datos	57
3.1.1. Variables de entrada	59
3.1.2. Variables de salida	60
3.2. Representación del conocimiento del experto	63
3.3. Implementación numérica	67
3.4. Expedientes clínicos virtuales	69
4. Validación clínica	72
4.1. Validación de expedientes clínicos virtuales	72
4.2. Validación del sistema de prescripción automatizada asistido por computadora.	73
5. Discusión	78
6. Conclusiones	81

Abstract

Automated decision support systems are computational tools that have been applied in clinical practice and have many benefits in processes, such as the diagnosis of diseases. Scientific and technological advancements in this area have led to the development of systems for other decision-making processes including medical prescriptions. This thesis deals with the automation of medical prescriptions making by designing a computer-aided system based on the experience of clinicians. The case study was the automation of the prescription of therapies for ankle fractures in a physical rehabilitation program. The database of the computer-aided prescription systems comprised a set of clinical records, from which the input variables were signs and symptoms related to ankle fracture rehabilitation and the output variables represented rehabilitation therapies that may be prescribed by clinicians. The system was clinically validated and its performance was quantified using confusion matrix metrics: 97.4% accuracy, 98.7% precision, 96.6% recall, 98.4% specificity and 97.6% F-score. Therefore, the proposed system could be a useful tool in decision-making processes as prescription therapies that could contributed to the later motivation regarding traditional physical rehabilitation programs by the optimization of resources for both patiens and physical rehabilitation centers, while rehabilitation objectives are achieved.

Keywords:

Computer-aided prescription, decision support systems, computer-aided diagnosis, physical rehabilitation, ankle fracture.

Resumen

Los sistemas automatizados de apoyo a la decisión son herramientas computacionales que se han aplicado en la práctica clínica y tienen muchos beneficios en procesos como en el diagnóstico de enfermedades. Los avances científicos y tecnológicos en esta área han llevado al desarrollo de sistemas hacia otros procesos de toma de decisiones, incluidas las prescripciones médicas. Esta tesis trata sobre la automatización de las prescripciones médicas mediante el diseño de un sistema asistido por computadora basado en la experiencia de los médicos. El caso de estudio fue la automatización de la prescripción de terapias para fracturas de tobillo en un programa de rehabilitación física. La base de datos de los sistemas de prescripción asistidos por computadora comprendía un conjunto de expedientes clínicos, de los cuales las variables de entrada fueron signos y síntomas relacionados con la rehabilitación de la fractura de tobillo y las variables de salida representaron las terapias de rehabilitación que pueden ser prescritas por los médicos. El sistema fue validado clínicamente y su rendimiento se cuantificó utilizando métricas de la matriz de confusión: 97.4% exactitud, 98.7% precisión, 96.6% sensibilidad, 98.4% especificidad y 97.6% F-score. Por lo tanto, el sistema propuesto podría ser una herramienta útil en los procesos de toma de decisiones como en las terapias de prescripción, que podrían contribuir a la motivación posterior de los programas de rehabilitación física tradicionales a través de la optimización de los recursos, tanto de los pacientes como de los centros de rehabilitación física, mientras se logran los objetivos de rehabilitación.

Palabras clave:

Prescripción asistida por computadora, Sistemas de apoyo a la decisión, Diagnóstico asistido por computadora, Rehabilitación física, Fractura de tobillo.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Actualmente, la automatización de procesos va en aumento en cualquier campo del que se trate. En el campo de la medicina, los avances tecnológicos han permitido el diseño de sistemas automatizados en esta área. El uso de sistemas asistidos por computadora son usados como herramientas de apoyo a las decisiones médicas, permitiendo el desarrollo de sistemas automatizados para el diagnóstico de distintas patologías. Este trabajo busca contribuir en la automatización de la rehabilitación, específicamente en la prescripción de terapias de rehabilitación para la fractura de tobillo, para determinar la selección de terapias y evaluar el desempeño de los ejercicios prescritos, debido a la alta incidencia que esta lesión presenta y considerando que el mayor progreso de la aplicación de la automatización en rehabilitación se ha reportado en la ejecución de los ejercicios de movilidad, a través de la intervención de dispositivos robóticos. La propuesta de un sistema para la automatización de la terapia para la fractura de tobillo, proporciona la recomendación de manera automatizada a través del diseño de un sistema experto, lo cual permitirá la recomendación de una terapia específica para cada paciente [1]. La automatización del programa de rehabilitación física (PRF) podría apoyar a la programación y al buen uso de los recursos del proceso de la rehabilitación para la fractura de tobillo, así como a la reducción del número de sesiones, mejorando el tiempo de recuperación del paciente [2]. La automatización de la prescripción

de la terapia de rehabilitación, podría conducir a mayores contribuciones en el campo de la medicina en rehabilitación. Respecto a diagnósticos de fracturas, los 12 más frecuentes dentro de 33 diferentes tipos o regiones anatómicas en las que se presentaron estas fracturas, el primer lugar en frecuencia lo ocuparon las fracturas de la pierna inclusive el tobillo con el 17.86%, las otras cuatro principales fueron las fracturas del fémur con 13.10%, las fracturas a nivel de la mano que representaron el 8.80%, las fracturas del húmero con el 6.61% y las fracturas del radio con el 6.36% [3]. La fractura de tobillo se encuentra entre las lesiones más comunes de las extremidades inferiores con mayor índice de atención en el área de urgencias de los hospitales [3, 4]; representan el 4% de los casos de fracturas [5], con más del 20% de las fracturas de extremidades inferiores [2] y el 9% de las valoradas en los servicios de traumatología y ortopedia [4].

Cuando una persona ha sufrido una fractura de tobillo, se recomienda atender un PRF después de su tratamiento. El PRF comprende la evaluación, prescripción y ejecución de las terapias para el logro de los objetivos de rehabilitación. Para definir las terapias de rehabilitación, es necesario contar con datos y mediciones cuantitativas que permitan decidir de forma objetiva y clara los parámetros involucrados en el desempeño motriz, que apoyen a definir el tipo y frecuencia de los ejercicios recomendados y a aplicar los medios necesarios para cumplir con los objetivos de rehabilitación establecidos. Actualmente, este proceso es común que se evalúe de manera cualitativa y mediante observación y exploración clínica con pruebas sencillas de equilibrio y fuerza muscular. Sin embargo, esto no define cuantitativamente y con certeza el protocolo óptimo para el cumplimiento de los objetivos [11].

1.2. Antecedentes

El tobillo es la articulación de miembros inferiores con la más alta incidencia de fracturas, tanto para hombres como para mujeres [2, 5]. Para garantizar la curación del tejido óseo dañado por la fractura, el tratamiento convencional incluye un período de inmovilización, que produce secuelas a corto y largo plazo [4]. Para tratar el efecto de estas secuelas y recuperar las habilidades musculares y articulares, la recomendación es que el paciente siga un PRF inmediatamente después del período de inmovilización, atendiendo el ciclo de rehabilitación clínica presentado en la Figura 1.1.

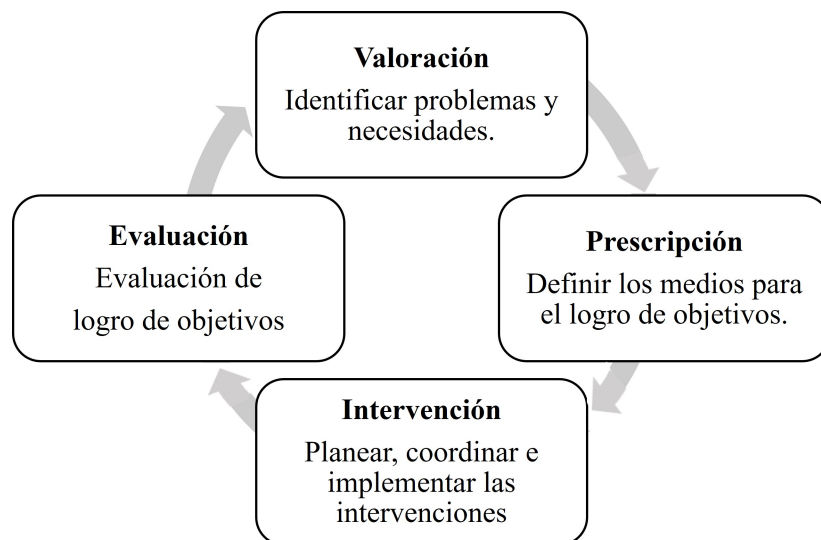


Figura 1.1: Etapas del ciclo de la rehabilitación clínica. Figura editada de [6].

En la etapa de valoración se identifican los problemas y necesidades del paciente, incluyendo los factores que determinan la condición del paciente y también se definen los objetivos de rehabilitación; en la etapa de prescripción se define el tratamiento y los medios necesarios para el logro de los objetivos; en la etapa de intervención se planea, coordina e implementan el tratamiento e intervenciones prescritas; en la última etapa llamada evaluación se evalúa el progreso del paciente de acuerdo con el nivel de logros de los objetivos. Si no se alcanzan los objetivos, el paciente inicia el proceso de la rehabilitación nuevamente hasta alcanzar los objetivos de rehabilitación. En la etapa de intervención las terapias

de rehabilitación se realizan con el apoyo de un fisioterapeuta; sin embargo, se ha reportado el uso de dispositivos de asistencia tales como las órtesis automatizadas que pueden apoyar en la recuperación de las habilidades articulares. Aunque actualmente su uso no es muy común en la práctica clínica, se han reportado los beneficios en la recuperación para otras patologías como el accidente cerebro vascular (stroke) [7]. En este capítulo se trata el estudio de la rehabilitación convencional de la fractura de tobillo y los avances en la automatización de etapas del ciclo de la rehabilitación física.

1.2.1. Rehabilitación convencional de fractura de tobillo

La fractura de tobillo es una lesión que afecta principalmente a la población económicamente activa. Esto implica que las fracturas de tobillo estén entre las lesiones que causan altos costos económicos para los pacientes y los sistemas de salud, debido al largo período de rehabilitación requerido para recuperar su condición. Los costos directos incluyen la discapacidad laboral debido a una parcial o total incapacidad para realizar el trabajo. Las instituciones de salud asignan entre 70 y 119 días de incapacidad temporal, dependiendo del tipo y grado de la lesión, el estatus del trabajador y el tipo de trabajo. Este período incluye el tratamiento quirúrgico o conservativo, rehabilitación hospitalaria, manejo conjunto desde el alta hospitalaria y sesiones diarias de rehabilitación [8–10]. Adicionalmente, están los costos indirectos tales como las complicaciones seguidas por la falta de movilidad y la manera en que esto afecta la vida diaria de los pacientes.

El tratamiento convencional de una fractura de tobillo puede ser conservativo (inmovilización del pie hasta por debajo de la rodilla con yeso, otros materiales o dispositivos externos) o quirúrgico (reducción abierta y fijación interna con material de osteosíntesis). Esto es seguido por un período de inmovilización para garantizar la curación del tejido óseo. El período de inmovilización trae consecuencias a corto plazo tales como atrofia muscular, trombosis venosa profunda, rigidez articular y edema, así como consecuencias a largo plazo tales como anomalías en la marcha, debilidad persistente en las piernas y un déficit permanente de habilidades articulares diferente a las que tenía el paciente antes de la

fractura [4]. Para reducir las secuelas, es importante que el paciente atienda un PRF desde la etapa inicial del tratamiento. El principal objetivo del PRF es ayudar a los pacientes a recuperar sus capacidades biomecánicas, que incluyen los principales movimientos del tobillo: dorsiflexión, plantarflexión, inversión y eversion (que se detallan en el siguiente capítulo de este documento) y así puedan regresar a sus actividades diarias. En la Tabla 1.1 se muestran las capacidades biomecánicas anatómicas y funcionales de los movimientos del tobillo.

Tabla 1.1: Capacidades biomecánicas deseadas en términos de los rangos óptimos de movimiento (ROMs) del tobillo [11].

<i>ROMs</i>		
Movimiento	Anatómico	Funcional
Dorsiflexión	10° – 20°	10°
Plantarflexión	20° – 45°	20°
Inversión	10° – 35°	10°
Eversion	10° – 25°	10°

Comúnmente, los tratamientos recomendados por especialistas en traumatología para tratar fracturas de tobillo incluyen un PRF para recuperar la función motora [12]. Los PRFs tradicionales comprenden un conjunto de terapias que debe ejecutarse durante un período de tiempo determinado. El objetivo de los PRFs es recuperar las habilidades motoras perdidas a causa de las fracturas. En general, las terapias con PRF tienen dos modalidades: (i) ejercicios de movilidad y fuerza y (ii) medios físicos. El objetivo de los ejercicios de movilidad y fuerza es recuperar el rango óptimo de movimiento (ROM) de la articulación lesionada y fuerza muscular a través de ejercicios pasivos (en los que el paciente requiere la ayuda de un fisioterapeuta) o ejercicios activos (en los que el paciente deberá realizar los ejercicios por su cuenta). También existen ejercicios activos asistidos, en los que el paciente requiere ayuda parcial de un fisioterapeuta. En contraste, el objetivo de los medios físicos es aliviar el dolor y reducir edema de la zona afectada mediante la aplicación de láseres, ultrasonido, cambios térmicos y terapia interferencial [11]. Los PRFs tradicionales se ilustran en la Figura 1.2.

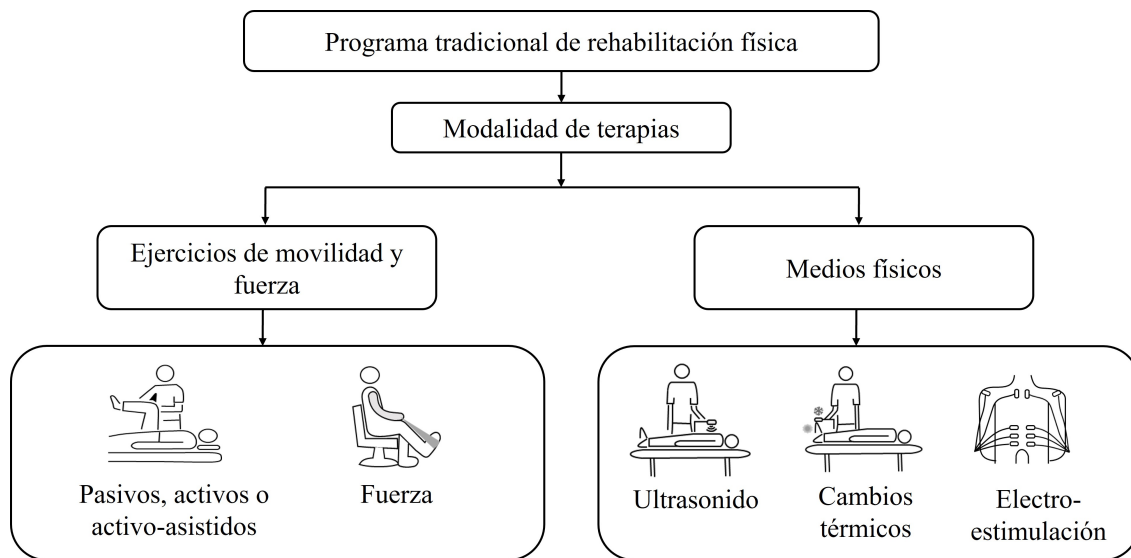


Figura 1.2: Dos modalidades de terapias ejecutadas en un PRF tradicional: ejercicios de movilidad y fuerza y medios físicos. La primera modalidad incluye ejercicios activos y pasivos o ejercicios activo-asistidos. La segunda modalidad incluye la aplicación de laser, ultrasonido, cambios térmicos y terapia interferencial [11].

En la práctica clínica el PRF forma parte del ciclo de rehabilitación recomendado por especialistas en traumatología para recuperar la motricidad [13]. Este es un proceso iterativo de ejecución de terapias basadas en evaluaciones clínicas para lograr los objetivos de rehabilitación. En cada iteración la decisión de continuar o completar el PRF depende de la evaluación del progreso de las habilidades funcionales del paciente. Para los PRFs tradicionales dichas evaluaciones se evalúan utilizando criterios objetivos y cuantitativos, incluyendo el juicio del médico para calificar el desempeño del paciente [14]. Si se toma la decisión de continuar con el PRF, los médicos suelen prescribir una selección específica de terapias basadas en el progreso del paciente. Estas recomendaciones se hacen de acuerdo con las directrices clínicas disponibles, como el protocolo del Hospital General de Massachusetts para rehabilitación de fracturas de tobillo con ORIF (por sus siglas en inglés de *Open Reduction Internal Fixation*) [15] o de acuerdo con las prácticas clínicas de un centro de salud concreto. Estas características de los PRFs tradicionales llevan a la pregunta de si esta decisión puede ser realizada automáticamente. Para abordar esta cuestión en este trabajo se propone un sistema

asistido por computadora para la prescripción automatizada de terapias específicas requeridas por los pacientes inscritos en un PRF. El objetivo es desarrollar una metodología computacional para procesar datos de los expedientes clínicos de los pacientes y representar el conocimiento clínico de los médicos, que es la base de la automatización de la prescripción. Una motivación posterior con respecto a los PRFs tradicionales es que la automatización puede favorecer la optimización de los recursos tanto para pacientes como para centros de rehabilitación física mientras se logran los objetivos de rehabilitación.

1.2.2. Avances en la automatización de la terapia de rehabilitación física

Las etapas de la rehabilitación clínica vistas en la Figura 1.1 se cumplen también para el ciclo de rehabilitación automatizada, sin embargo, cada una de ellas hace uso de tecnologías para la automatización, mejorando el proceso y la objetividad. La valoración y evaluación mide los niveles de discapacidad basados en pruebas de función motora del paciente de acuerdo con nivel de autonomía y define los objetivos de rehabilitación, usando sistemas automatizados de evaluación; la prescripción está basada en los objetivos de rehabilitación haciendo uso de sistemas de apoyo a la decisión para la definición de un protocolo óptimo de tratamiento, en la etapa de intervención se realiza la ejecución de la prescripción de acuerdo con el desempeño del paciente, utilizando sistemas robóticos de rehabilitación y sus resultados son basados en datos cinemáticos [6].

Respecto a la etapa de intervención, el uso de la terapia de rehabilitación física asistida por dispositivos automatizados tales como las órtesis o dispositivos fijos y su uso en la práctica clínica, está evolucionando y podría ir en aumento, aunque el impacto y evidencias reportados son pocos [7]. En este trabajo se llevó a cabo una revisión bibliográfica sobre el avance en dispositivos automatizados en rehabilitación física considerando el diseño, instrumentación y control de robots para rehabilitación de tobillo. En la Figura 1.3 se muestra el ciclo de rehabilitación automatizada.

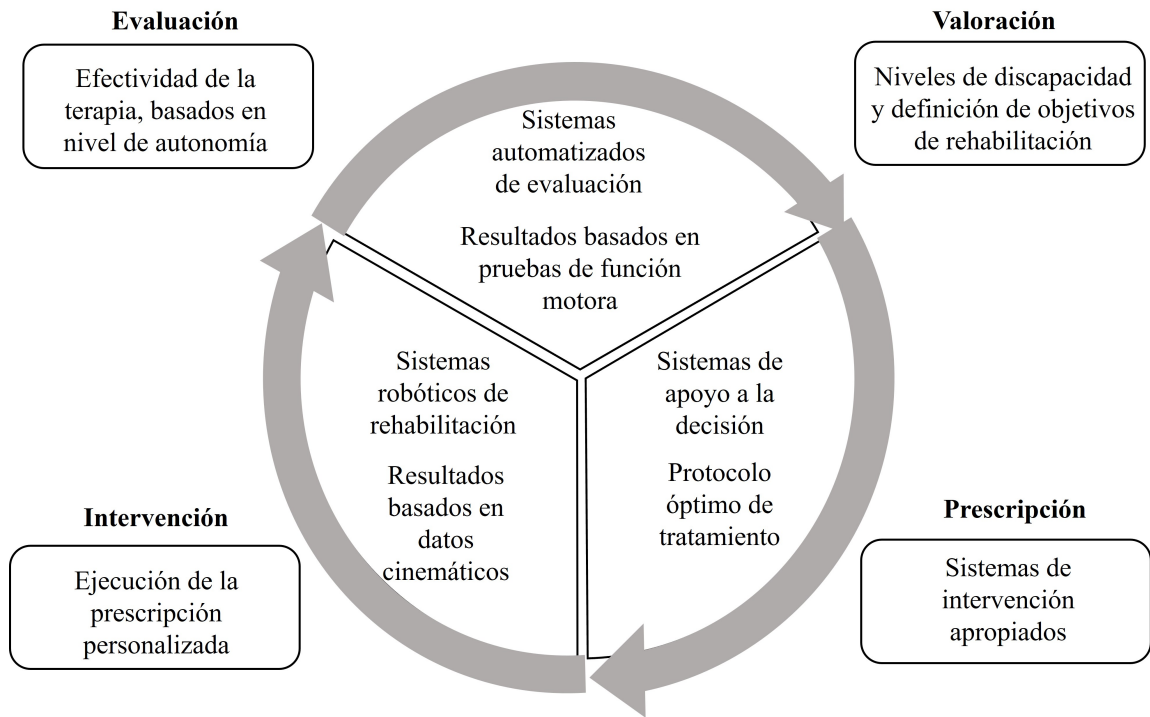


Figura 1.3: Etapas del ciclo de la rehabilitación automatizada. Figura editada de [6].

Avances en dispositivos de asistencia robótica

Después de una fractura las lesiones musculoesqueléticas disminuyen las capacidades biomecánicas del tobillo, principalmente los ROMs y fuerza muscular. Por esta razón, el principal objetivo de la rehabilitación física es recuperar estas capacidades. En un PRF el tipo de ejercicios de movilidad recomendados pueden ser de dos tipos: pasivos o activos. Respecto a los ejercicios pasivos asistidos por robots, una órtesis robótica asiste al paciente en la ejecución de ejercicios isométricos e isotónicos para recuperar los rangos de movimientos que se perdieron debido a la lesión. En los ejercicios activos el paciente realiza los movimientos articulares y la órtesis robótica proporciona resistencia al movimiento, de esta forma, se logra recuperar la fuerza. La intervención de las órtesis robóticas en rehabilitación está basada en la premisa de que estos dispositivos tendrán la capacidad de asistir al paciente para ambos tipos de ejercicios tanto activos como pasivos, mejorando tres parámetros en la ejecución de los ejercicios: control de la

exactitud, repetibilidad y objetividad. Para verificar esta premisa y garantizar el beneficio de la órtesis robótica en la rehabilitación, actualmente varios dispositivos han sido propuestos. Idealmente, un dispositivo de asistencia debe apoyar la recuperación de las funciones motoras del tobillo con un funcionamiento lo más cercano a las características biomecánicas de un tobillo sano, es decir, reproducir los movimientos articulares que el tobillo es capaz de realizar debido a las capacidades cinemáticas proporcionadas por su estructura ósea y las capacidades cinéticas proporcionadas por su estructura músculo-tendón-ligamento. Los dispositivos que emulan ambas capacidades de un tobillo saludable se dice que tienen un diseño bioinspirado [25]. Las características mecánicas de un dispositivo de asistencia son definidas por los objetivos del programa de rehabilitación recomendado al paciente después de sufrir una lesión musculoesquelética. Existen básicamente dos tipos de requerimientos clínicos en el diseño del dispositivo: i) asistencia en la ejecución de los ejercicios que rehabilitan los ROMs y la fuerza del tobillo; y ii) rehabilitación de la marcha. Para el primer requerimiento los dispositivos diseñados son llamados de plataforma [19], mientras que para el segundo requerimiento son llamados portátiles [16]. El diseño de estos dispositivos incluye diseño biomecánico, instrumentación, control e interfase de usuario.

Las características cinemáticas más relevantes que un diseño bioinspirado debe contener, son los movimientos articulares (grados de libertad) que el dispositivo será capaz de reproducir para apoyar los movimientos perdidos durante la lesión y el espacio de trabajo (rango de movimiento articular), que define los grados que el dispositivo debe alcanzar para asistir a la persona con respecto a sus ROMs. Por otro lado, las características cinéticas del dispositivo de asistencia son el par y fuerza articulares, requeridos para ejecutar los movimientos indicados en el procedimiento de la terapia; o manejo del par y fuerzas de oposición para poder llevar a cabo los ejercicios de fortalecimiento resistivo [26]. Éstos dispositivos pueden ser diseñados con diferentes grados de libertad (DOF por las siglas en inglés de *Degrees Of Freedom*). La cantidad de DOFs está relacionada con la capacidad de tareas y/o funcionalidades, mayor número de DOFs cubre varios modos de ejercicios; los dispositivos con varios DOFs son utilizados para realizar diferentes tareas [17] como los ejercicios de fortalecimiento (isométricos, isotónicos, e isocinéticos), balance, propiocepción o entrenamiento durante

la marcha [27], lo cual, incrementa su costo [28] pero también su espacio de trabajo [18–20, 26, 27, 30–32]. Estos dispositivos pueden realizar ejercicios pasivos, activo asistidos y activos resistivos, así como ejercicios de rehabilitación para teleoperación asistida [19, 29]. La mayoría de los dispositivos diseñados basados en plataforma para rehabilitación de tobillo reportados en la última década son diseñados con 3-DOFs [19, 20]. En dispositivos portátiles además de las características mencionados arriba, lo relevante del diseño son peso, potencia y seguridad; estos dispositivos son utilizados para rehabilitación en casa y/o telerehabilitación, por ejemplo, como entrenador de la marcha [16, 23, 24], rehabilitación temprana en cama [33], proporcionar terapia en diferentes posiciones como sentado, sobre la superficie, caminadora y posición supina [34]. El diseño propuesto por [16] realiza un manejo de las fuerzas y pares para lograr la potencia requerida, mientras que [34] asegura un par continuo en el desempeño del dispositivo, así, el diseño propuesto por [28] incluye músculos artificiales que proporcionan las fuerzas necesarias para los músculos correspondientes. Algunos diseños tanto de plataforma como portátiles utilizan el control de fuerza de retroactividad logrando que el paciente sienta menos resistencia/fricción por parte del dispositivo mientras realiza los movimientos del tobillo [30, 33].

La instrumentación de un dispositivo de asistencia consiste en la utilización de actuadores y sensores en su diseño y dependen de la estrategia de control y de los objetivos de rehabilitación. Los actuadores son para lograr una gran fuerza y algunos ejemplos son los actuadores eléctricos lineales utilizados en los dispositivos de [21, 30], actuadores músculo neumáticos (PMA) [16, 29], cilindros neumáticos de doble actuación [26, 27], actuadores músculo fluídicos festo (FFM) que generan una gran fuerza comparados con los actuadores neumáticos tradicionales [18, 21, 29, 31, 32] o servomotores actuadores [19]; [20, 35] utilizan como instrumentación, tres extremidades RUS (articulaciones de revolución, universal y esférica) y como actuadores motores eléctricos. En cuanto a sensores [18, 31] utilizaron sensores de presión, [19] sensores de fuerza y de precisión y [26] sensores de posición. Para el diseño de dispositivos portátiles, la instrumentación debe considerar las características de baja fricción, retroactividad, baja impedancia mecánica, confortable y de peso ligero. En los siguientes dispositivos se reportó el uso de músculos artificiales neumáticos [25], actuadores de doble actuación

neumáticos [20], actuadores giratorios [33], actuadores series elásticos compactos [24] y actuadores lineales [34]. En cuanto a sensores, [33] reportó el uso de un sensor de fuerza, mientras [34] dos juegos de sensores codificadores y [24, 34] usaron motores de corriente directa sin escobillas en sus diseños.

Un sistema de control es aquel en el que la salida del sistema se controla para obtener un valor específico o modificarlo, determinado según la entrada del sistema [36]. Tanto los dispositivos basados en plataforma como los portátiles, tienen estrategias de control de opciones de acuerdo con los componentes del sistema y la variable a controlar. Por ejemplo, el control proporcional integral derivativo (PID) es usado principalmente para producir una fuerza deseada a la salida [18, 22, 31]; el control proporcional derivativo plus (PD+) con realimentación se usa para mejorar el desempeño dinámico para ciertos actuadores elásticos en serie [23, 24, 26, 34]. la interacción humano-robot puede lograrse a través del control de impedancia, la cual puede ser referenciada como control de rigidez dinámico [21, 25]. La estrategia de control más usada reportada es el sistema de control basado en impedancia para obtener una velocidad [21, 27] y posición deseada [34]. También el control digital se ha usado para lograr estiramiento eficiente sobre el par resistivo de la articulación del tobillo en [33]. Se han utilizado sistemas de control basados en sistemas inteligentes tales como lógica difusa [16, 29] y optimización multi-objetivo [35].

El uso de una interfase embebida en el sistema en un dispositivo de asistencia robótica, proporciona un sistema de comunicación entre el usuario y el dispositivo y brinda información de desempeño y actividad del paciente así como del dispositivo [16]. También es una estrategia usada para el uso de juegos mientras los ejercicios son ejecutados [27, 33]. La implementación de realidad virtual (VR) y aprendizaje profundo, incrementan el apego del paciente en la terapia de rehabilitación mientras el terapeuta tiene acceso a mediciones objetivo y puede proveer comunicación remota [19, 26].

1.2.3. Automatización de diagnósticos en medicina

Existe una gran variedad de herramientas computacionales para automatizar el proceso de toma de decisiones en el campo de la medicina. Una de las aplicaciones más avanzadas son los diagnósticos asistidos por computadoras (CADs por las siglas en inglés *Computer-Aided Diagnosis*) [37–39]. Un sistema de diagnóstico asistido por computadora realiza la clasificación automática del estado de un paciente basado en los registros y procesamiento de información relacionada con los signos y síntomas que forman la base del diagnóstico de la enfermedad. Actualmente, esta área ha madurado considerablemente para el diagnóstico de diferentes tipos de cáncer incluyendo pulmonar y colorectal [40], mama [41] y próstata [42]; diferentes tipos de tumores [43]; complicaciones de la diabetes como el pie diabético [44] y retinopatía [45–47]; patologías cardíacas tales como fibrilación atrial y enfermedades visuales como la glaucoma [48]; y parálisis facial [49].

A diferencia del diagnóstico que involucra un solo estado para evaluar los signos y síntomas, un PRF involucra dos estados. En el primer estado, los pacientes visitan un centro clínico para una evaluación física donde el especialista prescribe un conjunto de terapias (movilidad y ejercicios para la fuerza y medios físicos) los cuales deben ser realizados para restaurar las habilidades funcionales del paciente de acuerdo con el programa proporcionado por el especialista. En un PRF tradicional, el primer estado es una decisión subjetiva que depende de la experiencia y habilidades del especialista. El segundo estado, que es la realización de las terapias está limitado a la capacidad hospitalaria y la indicación de ejercicios en casa es realizada por el paciente sin la supervisión de un fisioterapeuta. Por lo tanto, existe un reto en el desarrollo de sistemas de apoyo para la decisión automatizada en ambos estados del PRF para mejorar la selección de terapias y evaluar el desempeño en la ejecución de los ejercicios. Actualmente, la mayoría de la investigación en rehabilitación está concentrada en el segundo estado, principalmente en la medición automatizada de las variables de movimiento y para evaluar el desempeño de los ejercicios prescritos. Por ejemplo, Olesh *et al.* [50] presentaron un método para evaluar automáticamente los ejercicios de movilidad en PRF post-stroke para la rehabilitación de extremidad superior; el método consistió en una captura automática de los ángulos articulares del hombro, codo y muñeca usando

un sistema de captura de movimiento de bajo costo. Para rehabilitación cardiaca, Devob *et al.* [51] presentaron un sistema para monitorear automáticamente los ejercicios en casa usando un dispositivo de entrenamiento para pierna habilitado con internet; el sistema consistió en un mecanismo para miembro inferior usando sensores de temperatura inalámbrico para verificar cuándo los pacientes realizaron el entrenamiento. La información de los sensores fue monitoreada de forma remota a través de un software basado en la nube. Si se detectaba un aumento en la temperatura, esto implicaba que el dispositivo había sido usado. Lam *et al.* [52] presentaron un sistema automatizado para rehabilitación de cadera o rodilla después de un reemplazo quirúrgico, con medición automatizada de ángulos articulares utilizando datos de giroscopio y acelerómetro de unidades de medición inercial que usaban los pacientes mientras hacían los ejercicios. Los datos se recopilaban utilizando una interfaz para la retroalimentación del paciente y para el monitoreo que los fisioterapeutas realizaron sobre la actividad física del paciente, evaluar el progreso de la recuperación, actualizar y administrar los regímenes de ejercicio para los pacientes. De hecho, la medición automatizada de la ejecución de los ejercicios en programas de rehabilitación, así como para la supervisión y realimentación de forma remota de los especialistas, ha tenido popularidad en años recientes, como se puede ver en una revisión realizada por Moral *et al.* [53], en la cual los estudios más comunes son para stroke, enfermedad cardiaca, discapacidad de balance y rehabilitación articular de extremidades. Este artículo revisó software basado en teléfonos inteligentes que proporcionan facilidad de acceso a datos, comunicación entre el cuidador y el especialista, fácil interacción y pruebas clínicas. En otra revisión de software para aplicaciones móviles por Nussbaum *et al.* [54] incluyeron una numerosa lista de lesiones y enfermedades como lesiones musculoesqueléticas, médula espinal y traumática cerebral; enfermedades pulmonares y neurológicas, cáncer, dolor, padecimientos no específicos y programas de rehabilitación general [54]. Existen algoritmos para evaluar el desempeño de los ejercicios los cuales están basados en métricas establecidas por los especialistas. Por ejemplo, Liao *et al.* [14] presentaron una revisión exhaustiva enfocándose en algoritmos de aprendizaje automático; estos algoritmos evalúan automáticamente el rendimiento de un paciente y pueden utilizarse como apoyo para el desempeño de la evaluación en programas de rehabilitación tradicional.

Adicional al progreso en la evaluación y medición de ejercicios de movilidad en la segunda etapa en programas de rehabilitación, también existe el interés en desarrollar sistemas de apoyo a las decisiones para automatizar la determinación de qué terapias debe realizar un paciente en cada iteración del PRF para restaurar las capacidades funcionales. Por lo tanto, la parte medular de tales sistemas deben ser algoritmos para automatizar el conocimiento de los especialistas, basados en los datos del paciente y prescripciones basadas en guías médicas de la lesión o enfermedad. Han sido reportados algunos sistemas que buscan automatizar la decisión del especialista; por ejemplo, Maddison *et al.* [55] reportaron un programa automatizado para proporcionar prescripciones para ejercicios estandarizados, soporte técnico y estrategias de comportamiento (establecimiento de metas, programación de ejercicios y superación de barreras) basados en la American College of Sports Medicine guidelines enfocada en rehabilitación cardiaca. Si bien el artículo reporta los resultados aplicando su programa, no reportaron información sobre el método computacional o algoritmo que manejó el conocimiento del experto. Similarmente, Klein *et al.* [56] reportaron un estudio para desórdenes de ansiedad; anunciando la automatización completa de programas de tratamiento incluyendo un sistema de CAD llamado e-PASS. El proceso de evaluación se realizaba utilizando un conjunto de cuestionarios y cinco programas completamente automatizados de e-terapias de auto ayuda para comportamiento cognitivo dependiendo del desorden de ansiedad y síntomas. Este programa incluyó la entrega automática de correos de alerta para seguir el programa prescrito. Sin embargo, como en el caso de Madison *et al.* [55], los algoritmos para automatizar el conocimiento del experto no fueron reportados. La Figura 1.4 resume las principales aplicaciones de sistemas de apoyo a la decisión en medicina, en las cuales, de acuerdo con la literatura presentada, el área más madura es en el CAD.

Un sistema inteligente emula el razonamiento del ser humano y es capaz de procesar información y tomar decisiones de manera automatizada [57]. Existen diferentes tipos de sistemas inteligentes basados en inteligencia computacional o basados en el conocimiento, tales como los sistemas expertos o CADs basados en algoritmos genéticos (GA), sistemas de lógica difusa (FLS por las siglas en inglés *Fuzzy Logic System*), los sistemas basados en redes neuronales artificiales, entre otros [58]. En las últimas décadas, los sistemas inteligentes han sido utilizados en

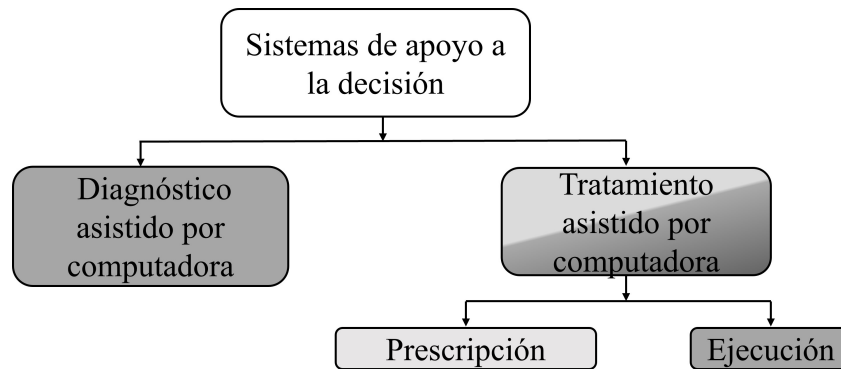


Figura 1.4: Los sistemas de apoyo a la decisión tienen dos principales aplicaciones en medicina: diagnóstico asistido por computadora (CAD) y tratamiento asistido por computadora. El diagnóstico asistido por computadora es el área más madura (cuadro gris oscuro a la izquierda), mientras que para el tratamiento, la mayoría de las investigaciones han sido enfocadas en automatizar la ejecución de terapias en PRFs (cuadro gris oscuro a la derecha). La automatización de prescripciones es un campo que se encuentra en una etapa temprana de investigación.

distintas áreas y específicamente en el campo de la medicina, se han diseñado sistemas inteligentes para el diagnóstico de patologías del sistema musculoesquelético, por ejemplo, se ha reportado el diseño de un sistema inteligente basado en un FLS tipo-2 usado para el diagnóstico de espondilitis anquilosante [59] y el diseño de un sistema basado en el método Delphi difuso para el diagnóstico y tratamiento de trastorno musculoesquelético de muñeca, en este último trabajo el autor reporta un 86.7% de exactitud del sistema, aplicando diferentes métricas de error como la raíz media cuadrática del error (RMSE) [57]. También se ha reportado el uso de sistemas inteligentes para el diagnóstico de otras patologías como el sistema clasificador adaptativo de sistema de inferencia neuro-difusa (ANFIS) para el diagnóstico de la enfermedad de la diabetes, para el cual, el autor reporta una exactitud del 89.47% usando el método del error medio cuadrático (MSE) para su cálculo [60]. Otro trabajo reportó el diseño de un sistema inteligente basado en un sistema experto difuso (FES) aplicando un método neuro-difuso para el diagnóstico de cáncer de mama en el cual se reporta una especificidad del 97%, sensibilidad 76%, valor predictivo positivo 96% y valor predictivo negativo 81% [61]. El diseño de un sistema inteligente FES basado en el optimizador Particle Swarm

Optimization (PSO) se reportó para el diagnóstico de la enfermedad coronaria con una exactitud de 93.27 %, usando la matriz de confusión como método para su cálculo [62]. En otro trabajo se reportó un sistema inteligente basado en sistema FES y GA para el diagnóstico de leucemia linfocítica aguda en niños, el cual reporta una exactitud del 98 % usando el MSE [63]. También se reportó el diseño de un sistema de clasificación neuro-difusa con algoritmo K-means y el algoritmo gradiente conjugado escalado (SCG) para el diagnóstico de la enfermedad de la tiroides con una exactitud del 89 % usando la matriz de confusión [64]. Se reportó el diseño de un sistema inteligente difuso basado en un FES con modelo de inferencia Mamdani para el diagnóstico de leucemia, el cual presenta una exactitud del 94 % usando la matriz de confusión para determinar esta métrica [65].

1.3. Planteamiento del problema

Se ha encontrado que en el PRF para la rehabilitación de la fractura de tobillo, la recomendación del conjunto de terapias es fija (estandarizada), es decir, no depende de las mediciones actuales de la condición fisiológica del área afectada, por lo que el número de sesiones y cantidad de terapias recomendadas es el mismo, independientemente del número de cita y progreso en el tratamiento de la lesión. Los sistemas de apoyo a la decisión médica reportados en la literatura, fueron mayormente diseñados para la automatización del diagnóstico de distintas patologías. También se encontró que el mayor progreso en automatización de la rehabilitación clínica está reportada en la ejecución de los ejercicios.

1.4. Hipótesis

La identificación de procesos (fisiológicos y físicos) dentro del programa de rehabilitación física de fractura de tobillo, permite definir condiciones de diseño para sistemas automatizados de apoyo a la decisión médica, como un sistema experto que proporcione la prescripción de las terapias recomendadas de manera automatizada.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Proponer una metodología para automatizar la prescripción de terapias de un programa tradicional de rehabilitación de fractura de tobillo.

1.5.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de esta investigación son:

1. Estudio del tratamiento convencional de rehabilitación de tobillo.
2. Obtención de bases de datos de pacientes enrolados en un programa de rehabilitación física después de haber sufrido una fractura de tobillo.
3. Diseñar un esquema de prescripción automático de recomendaciones (terapias y sus parámetros) basado en información cuantitativa y cualitativa de los procesos fisiológicos (mediciones biomecánicas).

1.6. Contribución

El alcance de este proyecto es desarrollar una metodología para definir un esquema de automatización de la terapia para la rehabilitación de la fractura de tobillo. El trabajo incluye el diseño de un sistema de prescripción automatizado basado en un sistema asistido por computadora como sistema experto, que proporcione de manera automatizada la recomendación de las terapias para la rehabilitación de la fractura de tobillo, aportando a la etapa de prescripción del ciclo de automatización de la rehabilitación (Figura 1.3). Este trabajo está orientado a la contribución de la aplicación de la automatización de la prescripción de terapias en el proceso de la rehabilitación de fractura de tobillo.

1.7. Lista de publicaciones

1. Cotri-Melecez, B., Quiroz-Compeán, G., Torres-Treviño, L., Rodríguez-Liñán, A., Quintero, I., y Fraire, O. S. (2024). Making medical prescription automatic: the case of prescribing therapies in ankle fracture rehabilitation by means of a computer-aided system. *IEEE Access*.
2. Cotri-Melecez, B., Quiroz-Compeán, G., Torres-Treviño, L., Rodríguez-Liñán, A., Quintero, I., y Fraire, O. S. (2021). Diseño de un sistema inteligente para la recomendación de terapias de rehabilitación de fractura de tobillo. 2º *Congreso Internacional de Mecatrónica*.
3. Zamora-Martínez, M., Rodríguez-Liñán, A., Quiroz-Compeán, G., Cotri-Melecez, B. (2021). Generación de Trayectorias Articulares para una Plataforma de Rehabilitación de la Fractura de Tobillo. *Congreso Nacional de Ingeniería Biomédica*.
4. Cotri-Melecez, B., Quiroz-Compeán, G. (en proceso). Current state of rehabilitation of ankle fracture: towards the intervention of automated assistive devices. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*.

1.8. Organización de la tesis

El capítulo 2 presenta la metodología de este proyecto de investigación desarrollando el marco teórico que incluye el estudio de la fisiología y anatomía de la articulación de tobillo, así como el estudio de la fractura de tobillo y su rehabilitación; en este capítulo también se presenta la metodología del sistema automatizado propuesto para la prescripción de terapias de rehabilitación de la fractura de tobillo: un sistema asistido por computadora. En el capítulo 3 se presentan el desarrollo del sistema automático de prescripción propuesto como un sistema experto y sus elementos, así como los resultados obtenidos de la implementación numérica y la generación de expedientes virtuales. En el capítulo 4 se presenta la metodología y resultados de la validación clínica para los expedientes clínicos virtuales y para el sistema experto propuesto. En el capítulo 5 se presenta la discusión de este trabajo y finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones de esta investigación.

Capítulo 2

Metodología

2.1. Marco teórico

2.1.1. Anatomía del tobillo

El tobillo es una articulación astragalina (articulación talocrural) formada por tres huesos: la tibia, el peroné y el astrágalo que forman la mortaja del tobillo compuesta por las articulaciones tibio astragalina, peroneo astragalina y tibio peronea como se muestra en la Figura 2.1. El astrágalo se considera también un hueso del pie, se une al pie a través de la articulación subtalar por la parte funcional trasera del pie que comprende al astrágalo y el calcáneo. La función principal del pie y del tobillo en el cuerpo humano es proporcionar una interfase estable y adaptable entre el cuerpo y la superficie para la locomoción, lo cual requiere que esta estructura sea flexible durante la fase de apoyo para adaptarse a diferentes terrenos de superficie, que le permita absorber y trasladar las fuerzas que mantienen la estabilidad del cuerpo humano [66].

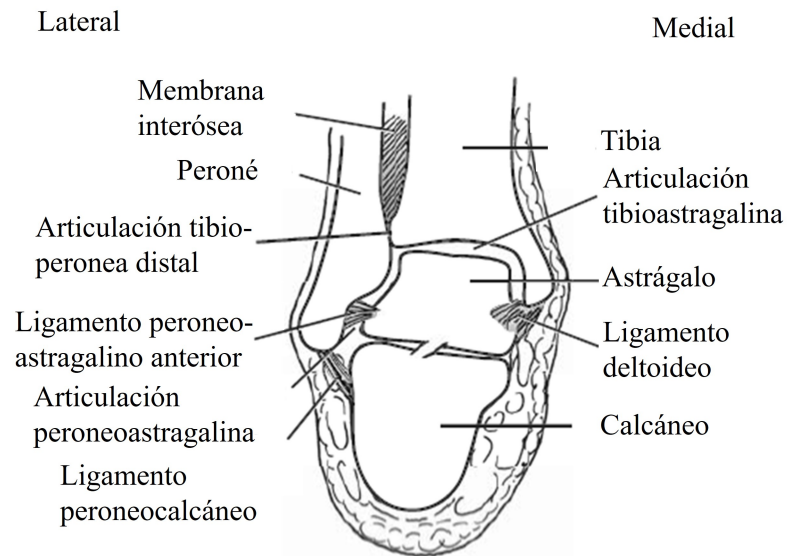


Figura 2.1: Complejo articular de tobillo compuesto de las articulaciones tibioastragalina, peroneo astragalina y tibio peronea. Figura editada de [66].

2.1.2. Movimientos del tobillo

La cinemática define el rango de movimiento y describe el movimiento de superficie de una articulación en tres planos: plano frontal (coronal o longitudinal), sagital y transversal (horizontal) como lo muestra la Figura 2.2.

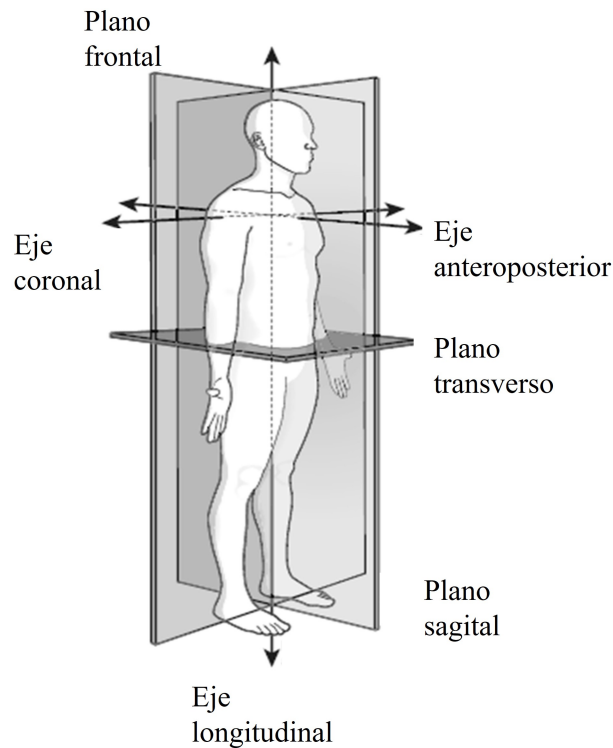


Figura 2.2: Ejes coronal, anteroposterior y longitudinal y planos frontal, sagital y transverso del cuerpo humano. Figura editada de [66].

Los movimientos del tobillo suceden alrededor de los tres ejes en los tres planos anatómicos, estos se describen de manera distinta a la descripción estándar de los movimientos de otras partes del cuerpo, por ejemplo, los movimientos de abducción y aducción del tobillo ocurren alrededor de un eje vertical en lugar de un eje anterior-posterior que es un movimiento llamado de rotación interna y externa en otras partes del cuerpo. La Figura 2.3 muestra los movimientos del tobillo donde se puede observar que el movimiento de dorsiflexión y plantarflexión del tobillo tienen lugar en el plano sagital; el movimiento de abducción y aducción sucede en el plano transversal; por último el movimiento de inversión y eversion sucede en el plano frontal o coronal respecto al eje anterior-posterior [66]. La tabla 2.1 muestra un resumen de los movimientos del tobillo.

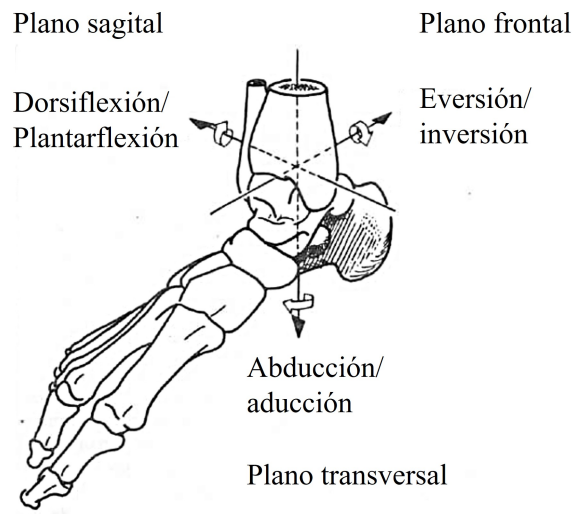


Figura 2.3: Movimientos del tobillo en los tres planos: sagital, transversal y frontal. Figura editada de [66].

Tabla 2.1: Movimientos del tobillo [66].

<i>Movimiento</i>	<i>Plano</i>
Dorsiflexión/plantarflexión	Sagital
Abducción/aducción	Transversal
Eversión/inversión	Frontal

Supinación y pronación son los términos que describen la posición de la superficie plantar del pie que sucede mayormente en la articulación subastragalina, este movimiento sucede al rededor de un solo eje oblicuo del pie que ocurre en las articulaciones talocrural, subtalar y mediotarsal, lo cual produce un solo grado de libertad con componentes de movimiento invariantes en los tres planos por lo cual, supinación y pronación son llamados triplanares, donde la supinación tiene componentes de plantarflexión, aducción e inversión y la pronación tiene componentes de dorsiflexión, abducción y eversión; esto significa que si cualquiera de estos movimientos está presente, los otros dos componentes también están ocurriendo. El tobillo es una articulación de bisagra que consiste en el astrágalo, maléolo medial, plafón tibial y maléolo lateral, su estabilidad depende de la congruencia articular y ligamentos internos, externos y los de la sindesmosis. La

articulación del tobillo es extremadamente estable debido principalmente a la congruencia ósea y soporte ligamentoso proporcionada por los dos maléolos y el plafón tibial que forman una articulación de mortaja con el domo del astrágallo [66]. Los ligamentos sindesmóticos consisten del ligamento tibiofibular anterior, el ligamento tibiofibular posterior y el ligamento interóseo. Ver Figura 2.4.

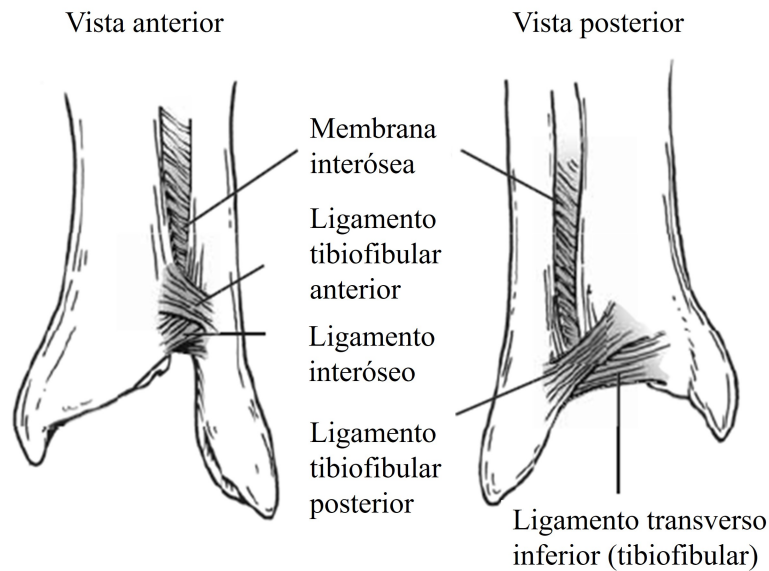


Figura 2.4: Componentes de la sindesmosis del tobillo. Figura editada de [66].

El eje del tobillo es un conjunto en un ángulo ligeramente oblicuo tal que la porción lateral (maléolo lateral) es posterior e inferior a la porción medial (maléolo medial). El eje puede ser estimado palpando las puntas de los maléolos como lo muestra la Figura 2.5. El eje se forma en un ángulo de aproximadamente 10° con el eje horizontal medial-lateral en el plano coronal y aproximadamente a 6° con el eje horizontal medial-lateral en el plano transverso; es por esta oblicuidad que se utilizan los términos de supinación y pronación para definir los movimientos del tobillo. Sin embargo, la oblicuidad es tan pequeña y la mayoría de los movimientos consisten en dorsiflexión y plantarflexión, que en la práctica clínica, los componentes de los otros dos planos se ignoran por lo que se sugiere la función del tobillo solo en el plano sagital [66].

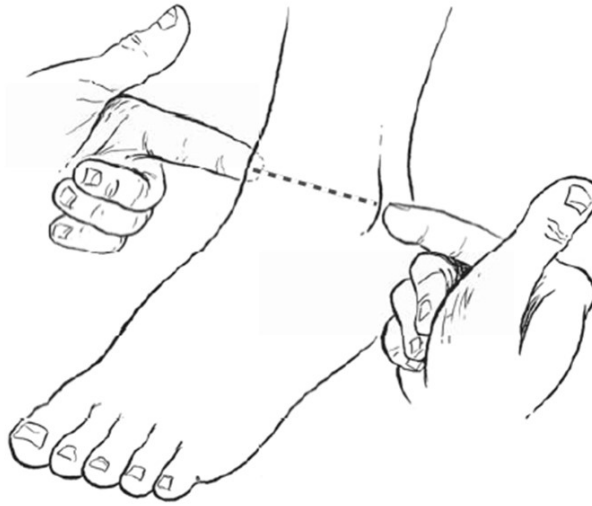


Figura 2.5: Eje de la articulación del tobillo estimado mediante palpación. Figura editada de [66].

El movimiento del tobillo sucede principalmente en el plano sagital con dorsiflexión y plantarflexión en la articulación talocrural. La articulación del tobillo presenta un amplio rango de movimiento en mediciones obtenidas con goniómetro de 10° a 20° dorsiflexión y 20° a 45° plantarflexión. Se sabe que para tobillos normales, el eje de rotación del tobillo no permanece constante durante plantarflexión/dorsiflexión si no que varía ligeramente hasta ubicarse dentro del astrágalo. La articulación subtalar tiene muy poco componente de movimiento de plantarflexión/dorsiflexión, por lo que se considera despreciable, los movimientos principales de la articulación subtalar son inversión/eversión y abducción/aducción. La combinación de las articulaciones talocrural y subtalar ofrecen libertad de movimientos en los tres planos. Los rangos de movimiento para la inversión son de 10° a 35° y para la eversión de 10° a 25° . Los rangos de movimiento son necesarios para realizar actividades de la vida diaria y para el patrón normal de la marcha, así como la acción de diferentes músculos involucrados con la articulación y movimientos del tobillo. Durante la bipedestación no está presente la acción muscular, sin embargo, para controlar la plantar flexión del tobillo y evitar la caída del pie bruscamente, se activa la musculatura tibial anterior durante el

inicio de la fase de apoyo y la musculatura posterior de la pantorrilla se activa durante la mitad y al final de la fase de apoyo para controlar la progresión del cuerpo sobre el pie. Los músculos que actúan en la articulación del tobillo para la acción de los movimientos son [11]:

- Flexores plantares del tobillo y pie:
 - Gemelos
 - Sóleo
 - Tibial posterior
 - Flexor largo común de los dedos
 - Flexor largo propio del primer dedo
- Dorsiflexores del tobillo y pie:
 - Tibial anterior
 - Extensor largo común de los pies
 - Extensor largo propio del primer dedo
- Eversores del pie:
 - Peroneo largo
 - Peroneo corto
- Inversores del pie:
 - Tibial posterior
 - Tibial anterior

Como se mencionó antes, la estabilidad de la articulación del tobillo está determinada por la congruencia articular y la integridad ligamentaria. Con carga, la estabilidad incrementa y depende más de la congruencia de la superficie articular. Al mantener la integridad de la sindesmosis se asegura que el ligamento deltoideo sea capaz de prevenir la eversión, la rotación externa del tobillo y el

desplazamiento astraglino lateral. En cuanto a las fuerzas involucradas con la articulación del tobillo, el peroné soporta un sexto de la fuerza ejercida a través de la extremidad inferior. Los ligamentos de la sindesmosis distal previenen la separación distal de la tibia y el peroné y ayudan a transmitir fuerza a través de la parte distal del peroné en carga, las fuerzas que actúan sobre el tobillo pueden elevarse a cinco veces el peso corporal durante la marcha y trece veces mientras se corre. La presión plantar en el pie debida a cargas se distribuye como sigue: un 60% en el tobillo, 8% en el pie medio, 28% en el antepie y 4% en dedos [66]. La condición de estabilidad en la articulación del tobillo puede cambiar debido a un traumatismo o torcedura y provocar una lesión. En este trabajo de investigación se presenta un estudio de la rehabilitación del tobillo debido a fractura, mismo que se describe enseguida.

2.1.3. Fractura del tobillo

Una fractura en un hueso es la rotura de su estructura ósea, la cual ocasiona interrupción de la continuidad de tejido óseo en la parte lesionada [67, 68]. Las fracturas se clasifican en traumáticas o patológicas, las fracturas traumáticas por sobrecarga son causadas por traumatismo anormal en un hueso, mientras que las fracturas patológicas o espontáneas son causadas por la rotura de un hueso debilitado por alguna enfermedad que afecta al tejido óseo. Este trabajo de investigación presenta el estudio de las fracturas causadas por traumatismo [68] que son las más comunes. Las fracturas sin desplazamiento ocurren cuando las partes óseas mantienen una alineación anatómica, mientras que en las fracturas con desplazamiento al menos una pieza pierde su alineación respecto a las demás.

Las fracturas se pueden clasificar de acuerdo con el trazo de la línea de fractura y el número de fragmentos en: fracturas oblicuas, transversas, fragmento mariposa o conminutas como se muestra en la Figura 2.6; de acuerdo con la exposición del hueso las fracturas se clasifican en cerradas o abiertas; las fracturas son llamadas cerradas si la piel del paciente permanece intacta en la parte lesionada; por otro lado, las fracturas abiertas llamadas también complicadas se presentan cuando los extremos puntiagudos del hueso fracturado salen a través de la piel del paciente, como se puede observar en la Figura 2.7.

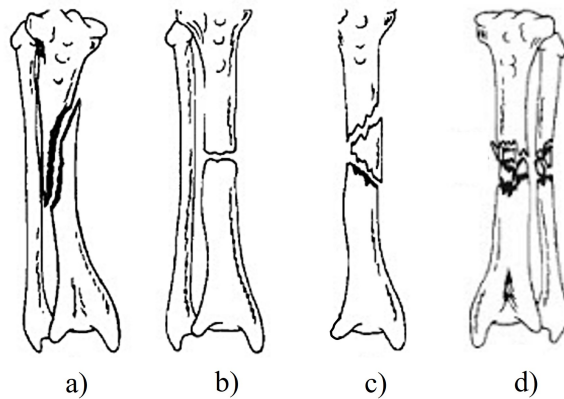


Figura 2.6: Tipos de fracturas: a) oblicua, b) transversa, c) fragmento mariposa y d) conminuta. Figura editada de [69].



Figura 2.7: Tipos de fracturas de acuerdo con la exposición del hueso: a) fractura cerrada y b) fractura abierta. Figura editada de [70].

Las fracturas del tobillo incluyen los maléolos¹ medial y lateral, así como la superficie articular distal de la tibia y el peroné y son descritas como sigue:

- Fracturas aisladas del maléolo interno: son fracturas en la extremidad de la tibia causadas por un traumatismo en abducción que evulsiona el maléolo interno por debajo de la interlínea articular, o por un traumatismo en aduc-

¹Los maléolos son cada una de las partes que sobresalen de la tibia y el peroné en el tobillo.

ción que puede cizallar el maléolo interno por encima de la interlínea articular.

- Fracturas aisladas del maléolo externo: es la lesión más frecuente de la articulación del tobillo, se rompe el maléolo externo por cizallamiento por encima de la interlínea articular a causa de un traumatismo en abducción o rotación externa.
- Fractura del maléolo externo y rotura del ligamento interno: es una lesión frecuente de segundo grado, por causa de una abducción o rotación externa forzada, donde se cizalla el maléolo externo y el ligamento interno del tobillo se rompe de tal manera que el astrágalo se desplaza lateralmente.
- Fractura bimalleolar (maléolos interno y externo): es causada por traumatismos graves del tipo abducción o rotación externa que cizallan el maléolo lateral por encima de la interlínea articular y avulsionan al maléolo interno por debajo de la línea interarticular.
- Fractura trimaleolar (fractura de los tres maléolos): que involucra los maléolos lateral y medial así como el margen posterior de la tibia (que se añade como tercer maléolo). Es una lesión de tercer grado por rotación externa que desplaza al astrágalo posteriormente para cizallar parte del margen posterior.
- Separación tibioperonea: es un traumatismo grave en abducción que provoca esguince del ligamento tibioperoneo y avulsiona el maléolo interno o desgarrar el ligamento medial y además puede estar presente también una fractura proximal en la diáfisis peroneal.
- Fracturas por compresión vertical de la tibia: llamadas fracturas de pión tibial como consecuencia de una caída de pie desde una altura considerable y pueden abrir el extremo distal de la tibia, causando la destrucción completa del tobillo.

Con frecuencia se utiliza el término fractura-luxación de Pott, para incluir la mayoría de las fracturas y fracturas-luxaciones que afectan los maléolos del tobillo,

de esta manera una lesión de primer grado afecta un maléolo, una lesión de segundo grado afecta dos maléolos (o un maléolo y un ligamento) y una lesión de tercer grado afecta los tres maléolos (o dos maléolos y un ligamento) [67]. Una manera práctica y conocida mundialmente de clasificar las fracturas de tobillo es con la clasificación de Danis-Weber que consiste en la evaluación de la fractura dependiendo la altura a la cual se encuentra la pérdida de continuidad del peroné: tipo A infrasindesmales (inferiores a la sindesmosis), tipo B transindesmales (al nivel de la sindesmosis) y tipo C suprasindesmales (superiores a la sindesmosis) como se muestra en la Figura 2.8 [71].

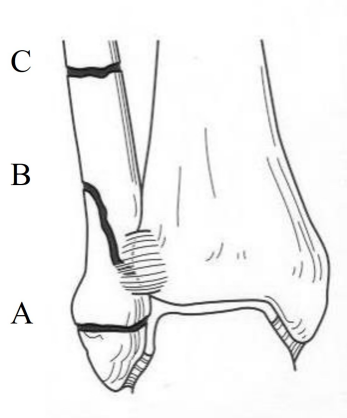


Figura 2.8: Clasificación de fractura de tobillo Danis-Weber: tipo A infrasindesmales, tipo B transindesmales y tipo C suprasindesmales [71]. Figura editada de [72].

Después de que una persona ha sufrido una fractura de tobillo y el hueso ha consolidado, la recomendación es llevar a cabo un PRF para recuperar la funcionalidad del tobillo y poder realizar las actividades de la vida diaria. En la siguiente sección se presenta la descripción de la terapia convencional para el tratamiento de la fractura de tobillo.

2.1.4. Terapia convencional para la rehabilitación de la fractura del tobillo

Las recomendaciones para la terapia de rehabilitación de la fractura de tobillo se prescriben por el especialista en traumatología al indicar un PRF, una vez que se ha alcanzado la consolidación ósea. Después que se ha tratado una fractura de tobillo, la consolidación ósea se logra en tres etapas: etapa de inflamación (10%), etapa de reparación (40%) y finalmente la etapa de remodelación (70%) las cuales se superponen, es decir, puede iniciar la siguiente etapa antes de que termine la anterior. La etapa inflamatoria dura entre una y dos semanas, la etapa reparadora dura varios meses, en esta etapa se forma un callo blando que es un hueso inmaduro y vulnerable a torceduras, por lo que no puede ser sometido a estrés, el término de esta etapa es definido por la estabilidad de la fractura y la línea de fractura empieza a desaparecer radiológicamente. La etapa remodeladora requiere de meses o años para completarse, en esta etapa el hueso esponjoso inmaduro y desorganizado se reemplaza por un hueso lamelar organizado añadiendo estabilidad a la fractura. Estos tiempos pueden extenderse de acuerdo al tipo de fractura, es decir, si se trata de una fractura abierta o complicada [11].

Los objetivos del tratamiento de rehabilitación para las fracturas de tobillo, son restaurar el rango de movimiento del punto de unión del tobillo en todos los planos y mejorar la fuerza de los músculos afectados por la fractura como consecuencia de la inmovilidad por el tratamiento. Los objetivos ortopédicos son lograr el equilibrio a través de la restauración del astrágalo y la estabilidad por reconstrucción del maléolo medial, lateral y posterior para la estática (permanecer de pie) y la dinámica (marcha) para la estabilidad de la unión del tobillo. El tiempo de curación del hueso es de seis a diez semanas para fracturas aisladas del maléolo lateral (extraarticular) y de ocho a doce semanas para fracturas bimalleolares, trimaleolares, bimalleolares equivalentes y maleolares mediales (intraarticular). Las terapias para la rehabilitación en general de las fracturas del tobillo se describen enseguida [11].

- Fisioterapia: se aplica crioterapia para el alivio del dolor, evitar el flujo sanguíneo y hematoma. Aplicar el método PRICE (protección, reposo, hielo (ice),

compresión y elevación).

- Ejercicios: ejercicios isométricos, isotónicos e isocinéticos para restaurar el rango completo de movimiento de la articulación del tobillo en todos los planos, para fortalecer los músculos afectados por la fractura como flexores plantares y dorsiflexores del tobillo y pie y eversores e inversores para el pie.
- Carga de peso: no cargar peso si no hay evidencia de estabilidad de la fractura; excepto para fracturas aisladas no desplazadas de peroné; se permite parcial o completa carga en la octava a duodécima semana.
- Precauciones: evaluar cualquier evidencia de síndrome de compartimiento de pie dorsal o de síndrome de compartimiento tibial, poner atención a las quejas de dolor, parestesia e incomodidad del yeso, estar atento a cualquier signo de infección, debe indicarse al paciente mantener la extremidad elevada.

En la Figura 2.9 se muestra la línea de tiempo de las etapas de consolidación ósea para una fractura cerrada.

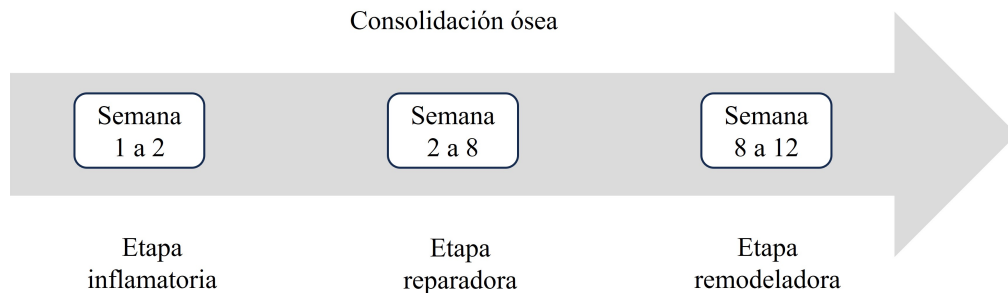


Figura 2.9: Línea de tiempo para la rehabilitación de la fractura del tobillo [11].

El tratamiento de rehabilitación y consideraciones ortopédicas para las lesiones de tobillo se describe a continuación [11]:

- Semana 1 y día de la lesión: fase inflamatoria, no hay estabilidad, las recomendaciones ortopédicas son: para tratamiento con yeso es verificar el

ajuste del yeso, recortar a la cabeza metatarsal y reforzar y reparar como sea necesario; para reducción abierta y fijación externa si el paciente usa un yeso de pierna corta, verificar los márgenes del yeso y recortar el pie del molde a las cabezas metatarsales. Para el proceso de rehabilitación con yeso en fracturas fijadas rígidamente, se recomienda rango de movimiento activo en articulaciones metatarsofalangeas y articulación de la rodilla, no rango de movimiento para el tobillo; en fracturas fijadas no rígidas se recomienda rango de movimiento en la articulación metatarsofalangeal y no rango de movimiento en tobillo o rodilla. No realizar ejercicios de reforzamiento para rodilla o pie, los ejercicios isométricos en cuádriceps son tolerados.

- Semana 2: inicia la fase reparadora, hay una mínima estabilidad o ninguna, las recomendaciones ortopédicas son: para tratamiento con yeso recortar el yeso hasta la cabeza metatarsal, evaluar ajuste y reforzar y reparar como sea necesario; para reducción abierta y fijación externa es recortar el yeso hasta la cabeza metatarsal, evaluar ajuste y reforzar y reparar como sea necesario. Para la rehabilitación con yeso para fracturas rígidamente fijas se recomienda rango de movimiento activo en articulaciones metatarsofalangeas y articulación de la rodilla, no se recomienda rango de movimiento para el tobillo; para fracturas fijas no rígidas rango de movimiento activo en articulaciones metatarsofalangeas, no rango de movimiento para tobillo o rodilla. Para la rehabilitación con yeso se recomienda rango de movimiento activo en articulación metatarsofalangea, fortalecimiento isométrico en cuádriceps con yeso; para reducción abierta y fijación externa la recomendación de rehabilitación es rango de movimiento activo en articulación metatarsofalangea y articulación de la rodilla y fortalecimiento isométrico de cuádriceps. Para el reforzamiento del músculo, en fracturas fijadas rígidamente ejercicios isométricos dorsiflexores y plantar flexores del talón y tobillo, no realizar ejercicios resistivos; para fracturas fijadas no rígidamente no ejercicios de reforzamiento.
- Semana 4 a la 6: etapa reparadora, el hueso podría estar curando y la frac-

tura es usualmente estable. Las recomendaciones ortopédicas son: para yeso si hay estabilidad se puede cambiar el yeso por un soporte de rótula o un yeso de pierna corta de soporte de peso, si no hay estabilidad continuar con el yeso de pierna larga; para reducción abierta y fijación externa se puede considerar quitar el yeso si hay estabilidad. Para la rehabilitación con yeso continuar con rango de movimiento activo en unión metatarsofalangea, iniciar para tobillo y rodilla como el dispositivo de inmovilización lo permita, fortalecimiento isométrico en cuádriceps, dorsiflexor de tobillo y flexores plantares; para reducción abierta y fijación externa rango de movimiento activo en articulación metatarsofalangea, articulaciones del tobillo y articulación de la rodilla, fortalecimiento isométrico en cuádriceps, dorsiflexor de tobillo y flexores plantares.

- Semana 6 a la 8: etapa reparadora, la fractura presenta estabilidad, las recomendaciones ortopédicas son: para tratamiento con yeso se puede remover el yeso si es estable; para reducción abierta y fijación externa se puede remover el yeso si no se ha hecho. las recomendaciones para rehabilitación son: con yeso continuar con los movimientos activos o activos asistidos de las articulaciones metatarsofalángicas, tobillo, subastragalina y articulaciones de la rodilla, también realizar ejercicios isotónicos e isocinéticos para el tobillo; para reducción abierta y fijación externa misma recomendación.
- Semana 8 a la 12: etapa remodeladora, la fractura presenta estabilidad. Las recomendaciones ortopédicas son: para tratamiento con yeso remover el soporte de rótula o yeso corto si no se ha hecho aún; para reducción abierta y fijación externa la misma recomendación. Para el tratamiento de rehabilitación con yeso iniciar con rango de movimiento activo, activo asistido y pasivo de las articulaciones del tobillo y subtalares, continuar con el rango de movimiento de las articulaciones metatarsofalángicas si todavía tiene yeso. Ejercicios progresivos resistivos para todo el grupo de músculos del tobillo; para la rehabilitación con tratamiento de reducción abierta y fijación externa es el mismo tratamiento que con yeso.

Una vez que existe la consolidación ósea en la fractura, es indicado un PRF con el objetivo de recuperar las capacidades biomecánicas a través de la recomendación de los ejercicios de movilidad y fuerza y la aplicación de medios físicos.

2.2. Sistema de prescripción asistido por computadora

El sistema de prescripción asistido por computadora propuesto en este trabajo, está basado en la ejecución de un PRF tradicional para fracturas de tobillo y está compuesto de expedientes clínicos y un conjunto de terapias, por otro lado, las reglas son basadas en el conocimiento de los especialistas. La Figura 2.10 ilustra el sistema propuesto.

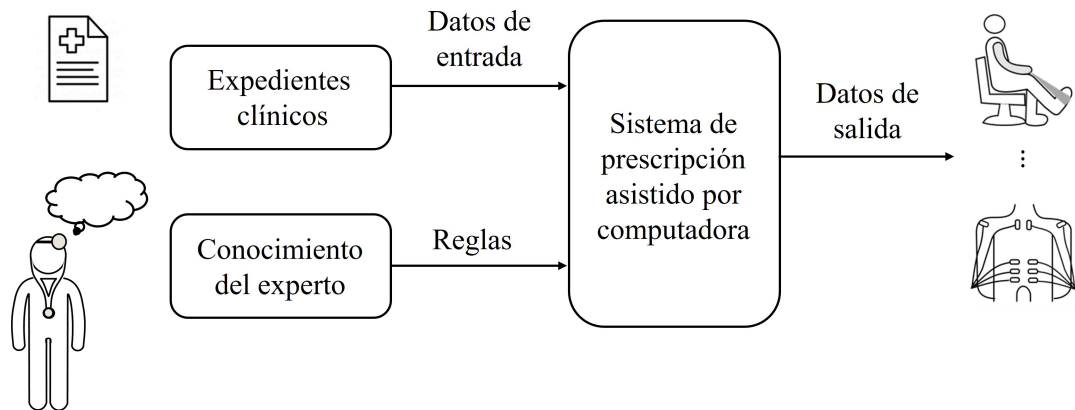


Figura 2.10: Diagrama de bloques del sistema de prescripción asistido por computadora propuesto. La base de datos incluye los expedientes clínicos (las variables de entrada) de pacientes que sufrieron una fractura de tobillo y del conjunto de terapias prescritas (las variables de salida). Las reglas del sistema son definidas por la experiencia y conocimiento de los especialistas. El sistema proporciona las terapias prescritas, las cuales pertenecen a un subconjunto del conjunto completo de terapias.

2.2.1. PRF tradicional para fractura de tobillo

Como se mencionó en el capítulo Introducción de este documento, el programa convencional de rehabilitación física para la fractura de tobillo consiste en la aplicación de dos tipos de terapias: la ejecución de ejercicios de movilidad y los medios físicos. Los ejercicios de movilidad tienen el objetivo de recuperar los ROMs y pueden ser pasivos, activo-asistidos o activos, mientras que los medios físicos como el ultrasonido o láser se aplican para el alivio del dolor y/o edema. Estas terapias son recomendadas en un PRF. En el caso específico de PRFs para fractura de tobillo, el tratamiento involucra dos estados. En el primer estado, los pacientes visitan el centro clínico para una valoración física y dependiendo de las condiciones biomecánicas, el especialista prescribe un conjunto de terapias (ejercicios de movilidad y fuerza y medios físicos) que deben realizar para la recuperación de las habilidades funcionales. El segundo estado se trata de la ejecución de estas terapias prescritas por parte del paciente, de acuerdo con el programa indicado por el especialista. En los PRFs tradicionales, el primer estado es una decisión subjetiva que depende de la experiencia y habilidad del especialista. Por otra parte, el segundo estado donde el paciente debe realizar las terapias indicadas, depende de la disponibilidad de instalaciones del hospital, las cuales regularmente son limitadas, lo que ocasiona que el paciente realice los ejercicios en casa sin la supervisión de un fisioterapeuta. De este modo, es un desafío desarrollar sistemas de apoyo a la decisión en ambos estados del PRF para mejorar la selección de terapias y evaluar el desempeño de la ejecución de los ejercicios prescritos. Actualmente, la mayoría de la investigación en automatización de la rehabilitación física está concentrada en el segundo estado, principalmente en la medición automática en las variables de movimiento y la evaluación del desempeño de los ejercicios prescritos [6]. Por esta razón, existe también el interés en desarrollar sistemas de apoyo a la decisión para automatizar la determinación de cuáles terapias debe realizar un paciente en cada iteración del programa de rehabilitación para recuperar sus habilidades funcionales. De esta manera, en este estudio, se propone un sistema de prescripción apoyado por computadora para automatizar el conocimiento del especialista basado en los datos del paciente y en las prescripciones basadas en guías médicas de la lesión o enfermedad.

En traumatología el tratamiento convencional para fractura de tobillo incluye dos enfoques: (i) Tratamiento conservativo que consiste en aplicar un yeso inmovilizador (también otros materiales pueden ser usados) cubriendo el pie y la pierna justo debajo de la rodilla, o si se requiere, otras herramientas externas pueden ser utilizadas. (ii) Tratamiento basado en cirugía que consiste en reducción abierta y fijación interna con materiales de osteosíntesis. De acuerdo con el enfoque seleccionado, el tratamiento de la fractura es seguido por un período de inmovilización de la pierna para permitir la consolidación ósea. La inmovilización ocasiona secuelas a corto y largo plazo como se mencionó en el capítulo 1 de este trabajo.

El proceso para recuperar las capacidades biomecánicas después de una fractura es como sigue: el especialista en el área de traumatología evalúa las capacidades biomecánicas del paciente; si tales capacidades no son las óptimas, el paciente debe atender el PRF. Al inicio del PRF, los expedientes de los pacientes son revisados por el especialista en el centro de rehabilitación. Subsecuentemente, las funciones musculares y articulares son medidas o estimadas y si estas funciones no son las óptimas, el especialista prescribe un conjunto de terapias [11], por otro lado, si las funciones musculares y articulares son óptimas, el especialista en rehabilitación da el alta clínica al paciente. La prescripción de terapias incluye el período de tiempo de la ejecución (por ejemplo, 10 a 15 días) y el número de series y repeticiones que el paciente debe ejecutar diariamente para cada terapia. Después del período de ejecución, el paciente regresa con el especialista en traumatología para la revaloración de las capacidades biomecánicas; si éstas están en el rango óptimo, entonces el paciente es dado de alta. De otra manera, el especialista recomienda volver al PRF. De esta manera, se puede ver que los PRFs son procesos iterativos que terminan cuando el paciente recupera sus capacidades biomecánicas. La Figura 2.11 describe las etapas principales del tratamiento tradicional de las fracturas de tobillo y las etapas específicas seguidas durante el PRF son mostradas en el cuadro gris. De acuerdo con la Figura 2.11 los principales elementos del ciclo iterativo de un PRF son la prescripción clínica, ejecución de las terapias y valoración de las capacidades biomecánicas; siendo el primero el elemento de interés a ser automatizado en este trabajo.

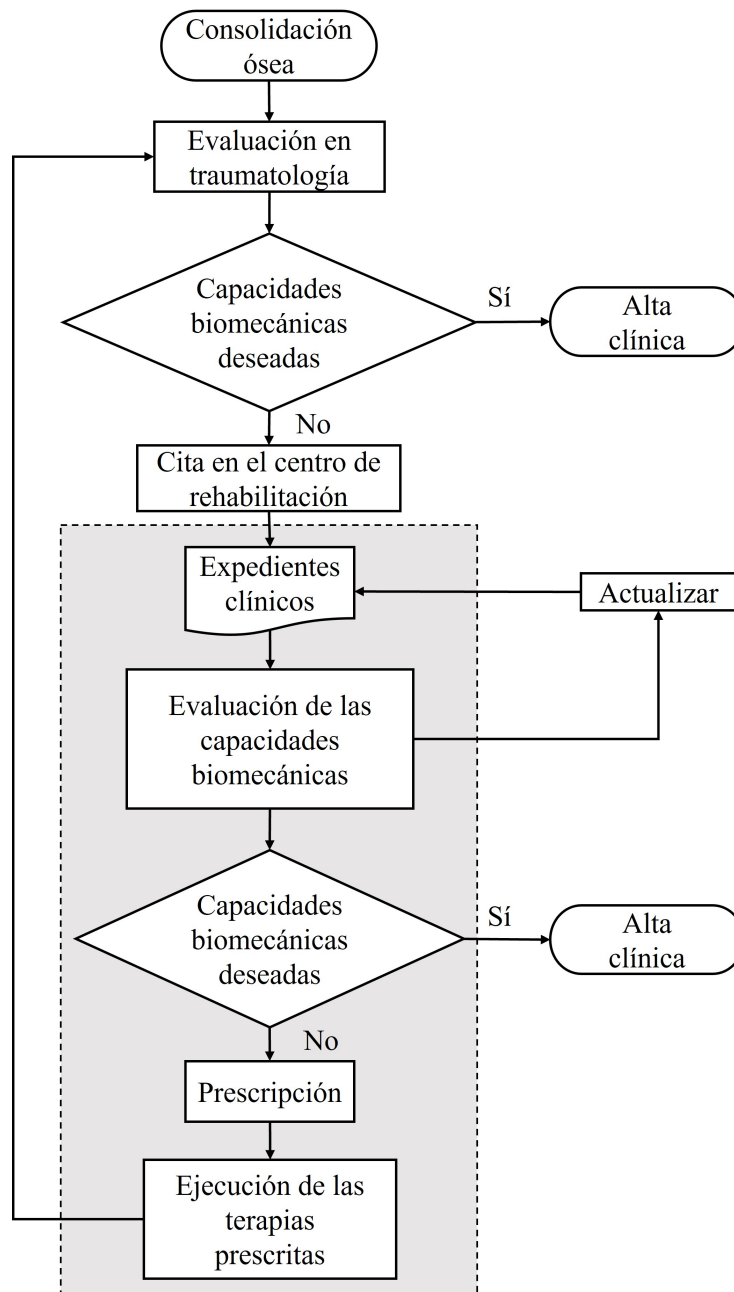


Figura 2.11: Diagrama de flujo de un tratamiento convencional para recuperar las capacidades biomecánicas después de una fractura de tobillo. El cuadro gris marca el proceso de un PRF tradicional.

2.3. Sistema propuesto: prescripción automatizada

Un sistema que sea capaz de tratar con este desafío requiere la adquisición automática de datos sobre las capacidades biomecánicas del paciente, manejo del conocimiento del experto (especialistas) y un método computacional para integrar estos elementos. Con esto en mente, el sistema propuesto de prescripción asistida por computadora tiene una base de datos que incluye los expedientes clínicos de pacientes quienes sufrieron una fractura de tobillo, el conocimiento del experto basado en las convenciones médicas para rehabilitación de fractura de tobillo reportadas en la literatura médica, así como en su experiencia como especialistas en rehabilitación física y el conjunto de terapias prescritas por el especialista como se muestra en la Figura 2.12.

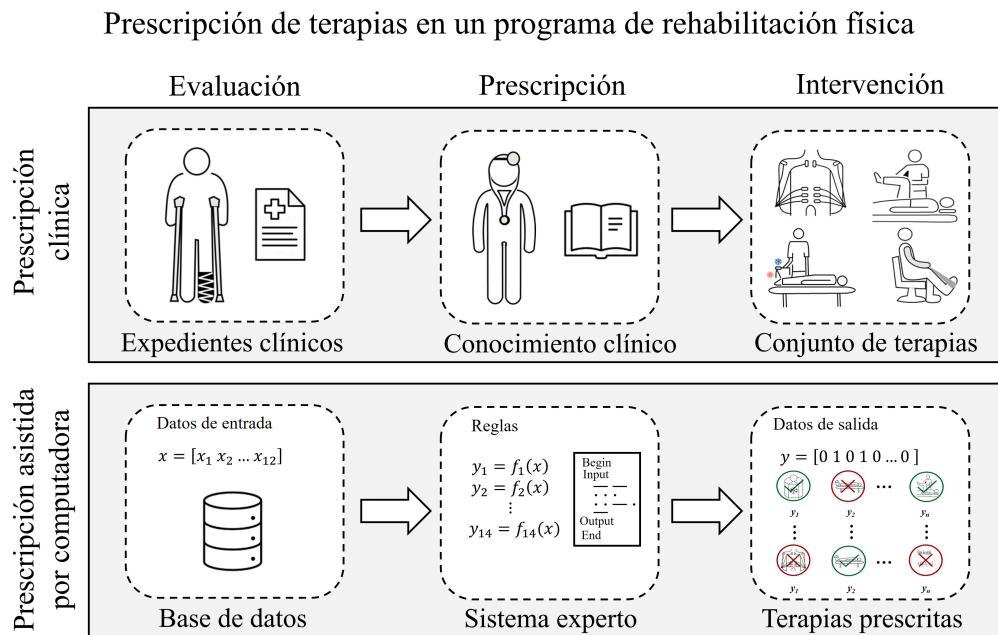


Figura 2.12: Elementos de la prescripción clínica y prescripción asistida por computadora.

Enseguida se describen los elementos del sistema propuesto de prescripción automatizada asistido por computadora.

2.3.1. Base de datos

La base de datos del sistema de prescripción asistido por computadora diseñado para automatizar la prescripción clínica del PRF, fue formada usando dos conjuntos de datos obtenidos del expediente clínico del paciente. El primer conjunto de datos corresponde a la nota de ingreso del paciente, en la cual se registran las condiciones del paciente, los datos personales y algunas condiciones clínicas como comorbilidades o antecedentes clínicos; el segundo conjunto de datos contiene las terapias que el especialista debe prescribir de acuerdo con las condiciones clínicas registradas. En este último conjunto de base de datos es donde se encuentran registradas las condiciones clínicas del paciente respecto a la fractura de tobillo, los objetivos de rehabilitación especificados por el especialista en traumatología y el conjunto de terapias de rehabilitación indicadas por el especialista en rehabilitación física, también contiene el registro del seguimiento de la evolución del paciente a través de la evaluación del paciente por cada cita que atiende en el centro de rehabilitación y en el área de traumatología, tal como se explicó en el capítulo Introducción de este trabajo en la descripción del proceso de un PRF. Como se puede observar, el segundo conjunto de base de datos del expediente clínico, es el de interés en este trabajo, ya que en éste se encuentra información relevante respecto a la rehabilitación del paciente. Estos dos conjuntos de datos se describen con detalle a continuación.

Convencionalmente, el expediente clínico de un paciente con fractura de tobillo contiene datos clínicos del departamento de traumatología y del centro de rehabilitación. Este expediente es actualizado en cada iteración del PRF hasta que las capacidades biomecánicas son alcanzadas. Los expedientes clínicos contienen dos tipos de datos, datos cuantitativos y cualitativos. Las variables cuantitativas son los movimientos articulares principales del tobillo, los cuales son, dorsiflexión, plantarflexión, inversión y eversión; estas variables son medidas en grados ($^{\circ}$) y sus valores deben estar dentro de los ROMs óptimos. Los movimientos articulares son las únicas variables cuantitativas del expediente clínico, por lo que el resto de las variables son cualitativas. La primera variable de ellas y que es cualitativa, es la fuerza muscular, que está definida usando la escala de Lovett and Daniels la cual registra seis niveles de fuerza: nula, pobre, deficiente, regular, buena y

normal. La segunda variable es limitación de movimiento, la cual es estimada en dos estados: existe o no existe la condición de limitación. La tercera variable es la condición del dolor, la cual es estimada usando la escala visual análoga (VAS) registrando cuatro niveles: no hay dolor, dolor leve, dolor moderado y dolor severo. La cuarta variable es edema, la cual es registrada por la técnica de escala de Godet que maneja cuatro niveles: no hay edema, edema leve, moderado y severo. La quinta variable es contractura, esta condición es registrada indicando si existe o no la condición en el tobillo del paciente. La sexta variable es la condición de la herida, la cual indica si la herida está adherida o no a los planos profundos de la piel. La séptima variable en el tobillo del paciente es llamada cambios tróficos, e indica si la condición existe o no. La octava variable es la sensibilidad y ésta se indica si la condición está alterada o no alterada. La novena condición es la marcha, la cual considera dos tipos de patrones, el patrón deseado de la marcha llamado eubásica y el no deseado llamado disbásica. La décima variable es la estabilidad articular y se indica si existe o no esta condición. Finalmente, la última variable cualitativa es la consolidación ósea, la cual es registrada indicando si existe o no esta condición. Los rangos y escalas de estas variables son estimados de acuerdo a las escalas estandarizadas reportadas en la literatura médica [11]. La Tabla 2.2 resume las variables de las condiciones clínicas de pacientes que han sufrido una fractura de tobillo.

El segundo conjunto de datos son el conjunto de terapias prescritas durante un PRF, el cual fue descrito en la Figura 1.2. Los ejercicios de movilidad es la terapia de mayor relevancia respecto a los ROMs de los movimientos articulares, los cuales son dorsiflexión, plantarflexión, inversión y eversión; dependiendo de la evolución del paciente, estos ejercicios pueden ser pasivos, activos o activo-asistidos. Conforme los movimientos articulares son recuperados, es importante promover el fortalecimiento muscular; para tratar con esto, es prescrita la ejecución de ejercicios isométricos, isotónicos, estiramiento y de propiocepción. Una vez que el paciente está en condiciones de caminar, los ejercicios de caminata son recomendados a través de la reeducación de la marcha y para mejorar el equilibrio. Sólo si es necesario y no hay presencia de dolor, un conjunto de masajes puede ser prescrito; por ejemplo, el masaje anti-adherente para la herida, masaje anti-edema y masaje descontracturante. Los medios físicos también apoyan a los

Tabla 2.2: Descripción de las variables registradas en los expedientes clínicos de pacientes que han sufrido una fractura de tobillo. Los estados, valores o escalas corresponden a convenciones médicas reportadas en la literatura [11].

<i>Descripción</i>	<i>Tipo</i>	<i>Estado</i>	<i>Valores/escala</i>
Movimientos articulares	Cuantitativa	Dorsiflexión Plantarflexión Inversión Eversión	10° a 20° 20° a 45° 10° a 35° 10° a 25°
Fuerza	Cualitativa	Nula Pobre Deficiente Regular Buena Normal	0 1 2 3 4 5
Limitación de movimiento	Cualitativa	Presente No presente	1 0
Dolor	Cualitativa	No presente Leve Moderado Severo	0 1 a 3 4 a 7 8 a 10
Edema	Cualitativa	No presente Leve Moderado Severo	0 x xx xxx
Contractura	Cualitativa	Presente No presente	1 0
Herida	Cualitativa	Adherida No adherida	1 0
Cambios tróficos	Cualitativa	Presente No presente	1 0
Sensibilidad	Cualitativa	Alterada No alterada	1 0
Marcha	Cualitativa	Disbásica Eubásica	1 0
Estabilidad	Cualitativa	Presente No presente	0 1
Consolidación ósea	Cualitativa	Presente No presente	0 1

ejercicios de movilidad para recuperar los movimientos articulares en ROMs; por ejemplo, la aplicación de ultrasonido y la terapia de cambios térmicos que consiste en la aplicación de hielo y calor alternadamente. La terapia interferencial es recomendada para tres condiciones: cuando hay presencia de dolor, edema y para apoyar a la consolidación ósea. Resumiendo, nueve terapias pertenecen al tipo para movilidad y fortalecimiento y cinco terapias al tipo de medios físicos. La Tabla 2.3 muestra estas catorce terapias organizadas por tipo, incluyendo su prescripción convencional, nueve terapias para ejercicios de movilidad y fuerza, mientras que para medios físicos son cinco terapias.

Los datos de los expedientes clínicos y terapias resumidos en las Tablas 2.2 y Tabla 2.3 respectivamente, son los dos conjuntos de información requerida para determinar la prescripción de un PRF. Enseguida se discuten las consideraciones para prescribir las terapias en un PRF basadas en el expediente clínico del paciente.

2.3.2. Conocimiento del experto

Como fue mostrado en la Figura 2.11, en un PRF tradicional la prescripción de las terapias de rehabilitación es una decisión realizada por el especialista. Tal decisión es basada sobre las capacidades biomecánicas registradas en los expedientes clínicos, la evaluación funcional del paciente y la experiencia y conocimiento del especialista. Si algunas de las capacidades biomecánicas no se encuentran en las condiciones deseadas, entonces, las terapias son prescritas; de otra manera, cuando las condiciones deseadas han sido alcanzadas no es necesario prescribir terapias y el paciente es dado de alta. Así, debido a que el proceso para realizar la decisión para la prescripción de las terapias del PRF involucra razonamiento condicional, el método directo para automatizar este proceso está basado en reglas del tipo SI-ENTONCES que relacionan las variables de entrada y salida descritas en las Tablas 2.2 y 2.3 respectivamente. Los elementos y estructura de cada regla depende del conocimiento del experto; estos elementos son listados en la Tabla 2.3. Las variables de entrada son relacionadas con las variables de salida y la estructura es definida por funciones que representan el razonamiento del especialista. Los diferentes estados que una variable puede tomar (tercera columna de la Tabla 2.2) determina la posible combinación definida por la regla.

Tabla 2.3: Conjunto de terapias en un PRF para rehabilitación de fractura de tobillo. Hay dos clases de terapia: ejercicios de movilidad y fortalecimiento y medios físicos. La prescripción convencional para cada terapia, es incluida de acuerdo con las convenciones médicas [11]. *Nota: reps es la abreviación de repeticiones.*

<i>Terapia</i>	<i>Prescripción</i>
Ejercicios de movilidad y fortalecimiento	
Ejercicios de movilidad: * Dorsiflexión * Plantarflexión * Inversión * Eversión	Un set diario de 10 reps Un set diario de 10 reps Un set diario de 10 reps Un set diario de 10 reps
Ejercicios isométricos	Un set diario de 8 a 10 reps
Ejercicios isotónicos	Un set diario de 8 a 10 reps
Ejercicios de estiramiento	Un masaje diario por 5 minutos
Ejercicios de propiocepción	Un set diario de 10 reps
Ejercicios para marcha	Una serie diaria de 10 a 15 vueltas en una pista de 3 metros
Masaje anti-adherente	Un masaje diario por 5 minutos
Masaje anti-edema	Un masaje diario por 5 minutos
Masaje descontracturante	Un masaje diario de 5 minutos
Medios físicos	
Ultrasonido	Una sesión diaria de 3 MHz por 5 minutos
Terapia de cambios térmicos	Una sesión diaria de calor y frío alternadamente por 15 minutos
Terapia interferencial para el edema	Una aplicación diaria 0 a 200 Hz por 15 minutos
Terapia interferencial para el dolor	Una aplicación diaria 80 a 150 Hz por 15 minutos
Terapia interferencial para consolidación ósea	Una aplicación diaria 100 Hz por 15 minutos

2.3.3. Reglas

El proceso de razonamiento condicional que realiza el experto para tomar la decisión de la prescripción de terapias del paciente que está en un PRF, representa la lógica del pensamiento humano, relacionado con reglas lógicas del tipo SI-ENTONCES, que relacionan las variables de entrada de un sistema con las variables de salida en forma de funciones, proporcionando un resultado que obedece a las posibles combinaciones de las variables involucradas como se muestra en la Figura 2.13 [73].

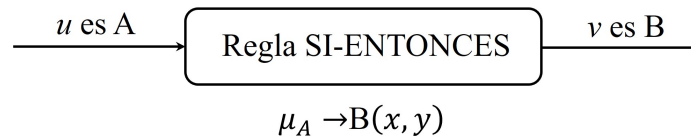


Figura 2.13: Representación de las reglas lógicas del tipo SI-ENTONCES utilizadas para el diseño del sistema experto. Figura editada de [73].

Para el diseño de las reglas que definen el sistema de prescripción automatizado de las terapias de un PRF, se aplicará el álgebra booleana, tablas de verdad y simplificación de funciones, lo que involucra el uso de las operaciones básicas de la lógica digital: AND, OR y NOT. En la lógica digital se manejan variables binarias, es decir, las variables sólo toman dos estados ya sea 0 o 1 lógicos. Estas operaciones y su representación binaria sirven para definir distintas condiciones y combinaciones de las variables de un proceso o sistema, en la Tabla 2.4 se presentan estas operaciones básicas y su representación numérica llamada tabla de verdad [73].

Tabla 2.4: Tablas de verdad de las operaciones lógicas AND, OR y NOT [73].

AND			OR			NOT	
x	y	$x \cdot y$	x	y	$x + y$	x	x'
0	0	0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1		
1	1	1	1	1	1		

En la mayoría de las ocasiones, al desarrollar el diseño de un sistema representado con variables binarias, es muy frecuente que las funciones resultantes de las operaciones lógicas, resulten de gran magnitud en cuanto a la cantidad de términos y cantidad de operaciones. En este sentido, es necesario llevar a cabo la simplificación de funciones para lo cual existen diversas técnicas, como la aplicación del álgebra de Boole. Si aún aplicando ésta técnica la función es todavía de gran magnitud, se pueden utilizar los mapas de Karnaugh que permite la simplificación de funciones con varios números de términos, de tal manera que al utilizar los mapas de Karnaugh se pueda simplificar una función. Por ejemplo, para la función representada por $F = x'yz + x'yz' + xy'z' + xy'z$ de tres variables, se obtiene su función simplificada aplicando los mapas de Karnaugh, donde la función simplificada es $F = x'y + xy'$ con solo dos variables. Como se puede observar, la función simplificada es una función con menos términos equivalente a la función original, lo que implica menor manejo de operaciones y menor carga computacional al momento de ejecutar el sistema.

Un sistema combinacional que relaciona las variables de entrada y de salida a través del diseño de un método computacional que involucre el razonamiento lógico del experto puede ser representado como se muestra en la Figura 2.14 donde se observa que el sistema está formado por una cantidad de n variables de entrada y m variables de salida, las cuales se introducen al sistema computacional diseñado y éste arroja las salidas esperadas.

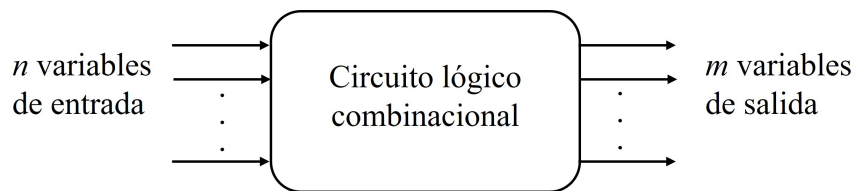


Figura 2.14: Estructura general del sistema que relaciona las variables de entrada con las variables de salida a través de un sistema de razonamiento condicional. Imagen modificada de [73].

En la Figura 2.5 se muestra el ejemplo del diseño de una regla binaria que representa el conocimiento del experto y que contiene tres entradas: entrada 1,

entrada 2 y entrada 3; donde la entrada 3 es discretizada y representada por el estado 1 y el estado 0.

Tabla 2.5: Conocimiento del experto representado por la tabla de verdad de una regla binaria.

<i>Entrada 1</i>	<i>Entrada 2</i>	<i>Entrada 3</i>		<i>Salida</i>
		<i>Estado 1</i>	<i>Estado 0</i>	
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	1
0	0	1	1	1
0	1	0	0	1
0	1	0	1	1
0	1	1	0	1
0	1	1	1	1
1	0	0	0	1
1	0	0	1	1
1	0	1	0	1
1	0	1	1	1
1	1	0	0	1
1	1	0	1	1
1	1	1	0	1
1	1	1	1	1

Capítulo 3

Resultados

En este capítulo se desarrolla la metodología propuesta, considerando el PRF para la rehabilitación de fractura de tobillo como un caso de estudio. Este procedimiento fue prescrito por los especialistas del Departamento de Medicina del Deporte y Rehabilitación del Hospital Universitario “Dr. José Eluterio González” de la Universidad Autónoma de Nuevo León, en Monterrey, Nuevo León.

Los elementos para la automatización de la prescripción de las terapias recomendadas para la rehabilitación de fractura de tobillo en un PRF, se muestran en la Figura 2.12 donde se puede observar la comparación entre la prescripción clínica y la prescripción automatizada. El proceso de rehabilitación inicia con la evaluación de las condiciones biomecánicas del paciente, de acuerdo con el proceso de un PRF (ver Figura 2.11) y en congruencia con el ciclo de rehabilitación automatizado propuesto por [6]. La valoración de las condiciones del paciente son estimadas y/o valoradas por el especialista en traumatología y/o el especialista en rehabilitación física a través de una exploración física. Estos datos son registrados y/o actualizados en el expediente clínico del paciente. La evaluación consiste en determinar si las condiciones biomecánicas que presenta el paciente son las deseadas, si lo son, se le dá el alta al paciente, de otra forma, es decir, si no son las deseadas, se le indica al paciente atender un PRF en un centro de rehabilitación. La evaluación del paciente en la prescripción clínica se toma directamente de la información contenida en los expedientes clínicos acerca de las condiciones del paciente, mientras que en la prescripción asistida por computadora, se obtienen

de una base de datos formada por variables de entrada digitalizadas que representan las condiciones del paciente. En la prescripción clínica, convencionalmente, después de que han sido valoradas las condiciones clínicas del paciente, el especialista las analiza de acuerdo con los objetivos de rehabilitación que se requieren para su recuperación y mediante un proceso de decisión y su conocimiento, recomienda un conjunto de terapias dirigidas a alcanzarlos. En la práctica clínica, el conjunto completo de terapias se recomienda en cada sesión, es decir, sin considerar qué terapias se requieren y cuáles otras ya no son necesarias de acuerdo con la evolución del paciente. En la prescripción asistida por computadora, al usar los datos de entrada de la base de datos, el sistema es capaz de realizar el proceso de razonamiento del especialista usando su conocimiento y tomar una decisión objetiva que consiste en la selección de terapias para la prescripción, considerando las condiciones clínicas del paciente.

3.1. Recolección de datos

Para obtener la base de datos, fue conducido un estudio retrospectivo y longitudinal para recolectar datos de entrada y salida de los pacientes quienes han estado enrolados en un PRF en este hospital entre 2017 y 2019. De acuerdo con la práctica clínica del hospital, un conjunto de terapias fue prescrito a los pacientes en cada cita de valoración durante el proceso de rehabilitación. En cada cita se generó una hoja de observación acerca de las condiciones del paciente (variables de entrada y salida) que incluye la prescripción realizada por el médico. Estos datos fueron registrados en cada cita del paciente para evaluar la recuperación de las capacidades biomecánicas. Debido a esta relación entre las variables de entrada y de salida prescritas de acuerdo con la experiencia y conocimiento del médico, es de interés el automatizar este proceso. La hoja de observación que es generada cuando un paciente atiende una cita es llamado expediente clínico real. El criterio de inclusión para considerar un expediente clínico real elegible fue como sigue: cada expediente debe ser de un paciente adulto de cualquier sexo con una fractura de tobillo. El tipo de fractura podría ser Weber tipos A, B, o C. El criterio de exclusión fue el uso de prótesis de extremidad inferior.

En este estudio 34 expedientes clínicos reales coincidieron con los criterios de inclusión y exclusión y fueron recolectados de 10 pacientes con diferentes números de citas (edad media, 39.4 años; desviación estándar, 10.9 años) quienes sufrieron una fractura de tobillo (cuatro categorizadas como Weber B, tres como Weber C y tres como no especificadas). Los expedientes clínicos seleccionados fueron analizados por un equipo colaborativo incluidos médicos especializados en rehabilitación física. La información relevante de los expedientes clínicos reales fue extraída y que corresponde a las condiciones clínicas definidas en la Tabla 2.2 y las prescripciones descritas en la Tabla 2.3. Un ejemplo de información extraída de los expedientes clínicos es ilustrado en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Ejemplo de la información extraída de cuatro expedientes clínicos reales de la base de datos de este estudio. Las condiciones clínicas fueron registradas de acuerdo con las escalas y valores reportados en la Tabla 2.2.

<i>Condición clínica</i>	<i>Expediente clínico real</i>			
	1	2	3	4
Movimientos articulares	Incompletos	Incompletos	Incompletos	Completo
Fuerza	4/5	4/5	4/5	4/5
limitación de movimiento	Si	Si	Si	No
Dolor	3/10	3/10	2/10	0
Edema	x	x	x	x
Contractura	Si	Si	Si	Si
Herida	No adherida	No adherida	No adherida	No adherida
Cambios tróficos	No	No	Si	No
Sensibilidad	No alterada	No alterada	No alterada	Alterada
Marcha	Disbásica	Disbásica	Disbásica	Disbásica
Estabilidad	No	Si	Si	Si
Consolidación ósea	Si	Si	Si	Si

Las variables de entrada de la base de datos que alimentan al sistema experto propuesto corresponden al conjunto completo de las condiciones clínicas definidas por los especialistas en cada cita de cada paciente. Por ejemplo, se puede observar que el expediente clínico ilustrado en la Tabla 3.1 pertenece a un paciente que atendió cuatro citas; esto es, la información proporciona cuatro diferentes series de variables de entrada. También se observa el cambio en la condición clínica con esta condición marcada en letra negrita. La Tabla 3.2 muestra el número de citas reportadas en cada uno de los 10 expedientes clínicos seleccionados. De esta

manera, la base de datos incluye 34 series de variables de entrada.

Tabla 3.2: Número de citas por expediente clínico real en la base de datos. Cada cita proporciona una serie de variables de entrada, así la base de datos incluye un total de 34 series.

<i>Expedientes clínicos</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total
<i>Número de citas</i>	4	3	3	3	2	2	3	6	1	7	34

3.1.1. Variables de entrada

Cada serie de variables de entrada está conformada por las 12 variables descritas en la Tabla 2.2 y es representada por el vector $x = [x_1 \dots x_{12}]^T$, cada elemento de x son variables binarias definidas como sigue: x_1 representa los movimientos articulares, x_2 la fuerza, x_3 limitación de movimiento, x_4 dolor, x_5 edema, x_6 contractura, x_7 herida, x_8 cambios tróficos, x_9 sensibilidad, x_{10} marcha, x_{11} estabilidad y x_{12} consolidación ósea. De los valores y escalas reportadas en la Tabla 2.2, el registro de las variables de entrada depende del razonamiento médico. Por ejemplo x_1 tiene una escala para cada una de las cuatro articulaciones angulares. Sin embargo, cuando un especialista evalúa un movimiento articular, considera si todos los ROMs están completos. En la práctica x_1 es representada por dos estados; esto es, el paciente ha alcanzado o no los ROMs de los cuatro movimientos articulares. Esto implica que x_1 es una variable binaria dicotómica, lo cual indica que $x_1 \in \{0, 1\}$. Respecto a x_2 , esta variable toma valores desde 0 a 5 de acuerdo con la escala reportada en la Tabla 2.2, sin embargo, convencionalmente, la escala es discretizada para representar cuatro estados, esto es $x_2 \in \{00, 01, 10, 11\}$. Doble cero (00) representa el nivel 0 en la escala, 01 representa el rango de 1 a 3, 10 representa 4 y 11 representa el nivel 5 en la escala de la fuerza; así, x_2 es una variable binaria politómica. x_4 es también una variable binaria politómica, la cual es representada como $x_4 \in \{00, 01, 10, 11\}$; esta variable es reportada entre 0 y 10 de acuerdo con la escala de Lovett y Daniels, pero la escala es convencionalmente agrupada por los especialistas para representar cuatro estados, esto es, la escala discretizada representada por 00 para el nivel 0 de la escala, 01 para

el nivel de 1-3, 10 para 4-7 y 11 para el nivel de 8-10. x_5 es también una variable binaria politómica representando cuatro estados en la escala de Godet: esto es $x_5 \in \{00, 01, 10, 11\}$, donde 00 representa que no hay edema, 01 representa el nivel x, 10 representa xx y 11 representa xxx. El resto de las variables, es decir, $x_3, x_6, \dots, x_{12}$, son variables binarias dicotómicas, de acuerdo con los posibles valores que representan como son reportados en la Tabla 2.2. La Tabla 3.3 resume los tipos, números de bits y las combinaciones posibles que una variable puede tomar para representar las diferentes condiciones clínicas, escalas y valores reportadas en la Tabla 2.2. La definición del tipo y estados de una variable está en concordancia al razonamiento médico, en las cuales las variables de entrada son registradas como datos binarios. Estos datos son la información de entrada para el sistema experto propuesto. Un ejemplo de la binarización de las variables de entrada correspondiente a los expedientes clínicos reales reportados en la Tabla 3.1 es presentado en la Tabla 3.4.

3.1.2. Variables de salida

El sistema asistido por computadora proporciona una prescripción clínica, la cual depende de las variables de entrada registradas en los expedientes clínicos. Así, las variables de salida del sistema experto son las 14 terapias reportadas en la Tabla 2.3 y cada variable de salida es definida como sigue: y_1 representa la terapia para los ejercicios de la movilidad (el conjunto completo incluyendo dorsiflexión, plantarflexión, inversión y eversión), y_2 representa los ejercicios isométricos, y_3 ejercicios isotónicos, y_4 ejercicios de estiramiento, y_5 representa los ejercicios de propiocepción, y_6 ejercicios para la marcha, y_7 representa el masaje anti-adherente, y_8 masaje anti-edema, y_9 masaje descontracturante, y_{10} ultrasonido de profundidad superficial, y_{11} representa la terapia de cambios térmicos, y_{12} representa a la terapia interferencial para el edema, y_{13} la terapia interferencial para el dolor y y_{14} representa la terapia interferencial para la consolidación ósea.

En la lógica convencional para rehabilitación clínica, dependiendo de los valores de las 12 variables de entrada, los especialistas recomiendan las terapias, por lo tanto, las variables de salida y_1 a la y_{14} son binarias y dicotómicas asignando como 0 para no ejecutar la terapia y como 1 para ejecutar la terapia. Así, la varia-

Tabla 3.3: Discretización de las variables de entrada.

<i>Variable de entrada</i>	<i>Tipo</i>	<i>Número de estados</i>	<i>Combinaciones</i>		<i>Condición clínica</i>
x_1	Dicotómica	2^1	0		ROMs completos
			1		ROMs incompletos
x_2	Politómica	2^2	D1	D0	Fuerza
			0	0	No hay fuerza
			0	1	Fuerza leve
			1	0	Fuerza regular
			1	1	Fuerza normal
x_3	Dicotómica	2^1	0		No limitación de movimiento
			1		Limitación de movimiento
x_4	Politómica	2^2	D1	D0	Dolor
			0	0	No hay dolor
			0	1	Dolor leve
			1	0	Dolor moderado
			1	1	Dolor severo
x_5	Politómica	2^2	D1	D0	Edema
			0	0	No hay edema
			0	1	Edema leve
			1	0	Edema moderado
			1	1	Edema severo
x_6	Dicotómica	2^1	0		No hay contractura
			1		Contractura
x_7	Dicotómica	2^1	0		Herida no adherida
			1		Herida adherida
x_8	Dicotómica	2^1	0		No hay cambios tróficos
			1		Cambios tróficos
x_9	Dicotómica	2^1	0		Sensibilidad no alterada
			1		Sensibilidad alterada
x_{10}	Dicotómica	2^1	0		Marcha eubásica
			1		Marcha disbásica
x_{11}	Dicotómica	2^1	0		Estabilidad
			1		No hay estabilidad
x_{12}	Dicotómica	2^1	0		Consolidación ósea
			1		No hay consolidación ósea

Tabla 3.4: Ejemplo de discretización de las variables de entrada reportadas en el expediente clínico analizado en la Tabla 3.1.

<i>Variable de entrada</i>	<i>Número de cita</i>			
	1	2	3	4
x_1	1	1	1	0
x_2	1 0	1 0	1 0	1 0
x_3	1	1	1	0
x_4	0 1	0 1	0 1	0 0
x_5	0 1	0 1	0 1	0 1
x_6	1	1	1	1
x_7	0	0	0	0
x_8	0	0	1	0
x_9	0	0	0	1
x_{10}	1	1	1	1
x_{11}	1	0	0	0
x_{12}	0	0	0	0

ble de salida del sistema experto es el vector $y = [y_1, y_2, \dots, y_{14}]^T$, donde cada y_i para $i = 1, \dots, 14$ puede ser 0 o 1. En la Tabla 3.5 se muestra las variables de salida y_1 a la y_{14} .

Resumiendo, el resultado del proceso de la recolección de datos es la base de datos del sistema experto propuesto la cual incluye los datos de entrada y salida x_{12} y y_{14} respectivamente, ambas variables son binarias y pueden ser usadas para relacionar la condición clínica del paciente (x) y las prescripciones de las terapias (y) y cuya relación está definida por el conocimiento del experto, representadas por las relaciones descritas en el siguiente tema desarrollado de este trabajo: representación del conocimiento del experto.

Tabla 3.5: Variables de salida del sistema experto de la y_1 a la y_{14} reportadas en la Tabla 3.1 y que representan al conjunto de terapias prescritas para la rehabilitación de fractura de tobillo.

<i>Variable de salida</i>	<i>Nombre</i>
y_1	Ejercicios de movilidad
y_2	Ejercicios de isométricos
y_3	Ejercicios de isotónicos
y_4	Ejercicios de estiramiento
y_5	Ejercicios de propiocepción
y_6	Ejercicios para la marcha
y_7	Masaje anti-adherente
y_8	Masaje anti-edema
y_9	Masaje descontracturante
y_{10}	Ultrasonido de profundidad superficial
y_{11}	Terapia de cambios térmicos
y_{12}	Tarapia interferencial para el edema
y_{13}	Tarapia interferencial para el dolor
y_{14}	Tarapia interferencial para la consolidación ósea

3.2. Representación del conocimiento del experto

Como fue descrito en el capítulo 2, un sistema experto fue propuesto para automatizar la prescripción de terapias en un PRF para fracturas de tobillo. La representación matemática del conocimiento del experto consiste en un conjunto de funciones. Esta representación fue seleccionada por dos razones: (i) la naturaleza binaria de la base de datos y (ii) la lógica de los especialistas para decidir acerca de las prescripciones basadas en las condiciones clínicas del paciente. Debido a que la prescripción es representada por y , sus 14 componentes son funciones que dependen de la variable de entrada x ; así, el conocimiento del experto es representado por 14 funciones. El resumen de la relación entre las variables de entrada x y las variables de salida y , es decir, las condiciones del paciente y las terapias prescritas, se muestran en la Tabla 3.6 y las 14 funciones se describen a continuación.

Tabla 3.6: Representación del conocimiento del experto a través de la relación de las condiciones del paciente con las terapias recomendadas.

<i>Variable de salida en función de la variable de entrada</i>
$y_1 = f_1(x_1, x_3)$
$y_2 = f_2(x_2)$
$y_3 = f_3(x_2)$
$y_4 = f_4(x_1, x_3, x_6)$
$y_5 = f_5(x_3, x_9, x_{10}, x_{11})$
$y_6 = f_6(x_{10})$
$y_7 = f_7(x_7)$
$y_8 = f_8(x_4, x_5)$
$y_9 = f_9(x_4, x_6)$
$y_{10} = f_{10}(x_4)$
$y_{11} = f_{11}(x_4, x_5, x_8)$
$y_{12} = f_{12}(x_5)$
$y_{13} = f_{13}(x_4)$
$y_{14} = f_{14}(x_{12})$

- *Ejercicios de movilidad (y_1)*. Esta terapia incluye un conjunto de cuatro ejercicios para recuperar los ROM en dorsiflexión, plantarflexión, inversión y eversión. y_1 es prescrita si los movimientos articulares son incompletos ($x_1 = 1$) **OR** (+) si está presente la limitación de movimientos ($x_3 = 1$). Por lo tanto, la desición es representada por la siguiente función lógica:

$$y_1 = x_1 + x_3. \quad (3.1)$$

- *Ejercicios Isométricos (y_2)*. Esta terapia es recomendada cuando la evaluación clínica indica que la fuerza articular (x_2) es limitada. Definiendo $D0$ como el bit menos significativo (LSB) y $D1$ como el bit más significativo (MSB) de una variable binaria. La terapia es prescrita cuando $x'_2D1 = 1$ **OR** $x'_2D0 = 1$, donde (') representa al operador **NOT** de una variable. Por lo tanto, de acuerdo con la Tabla 3.3, la prescripción es representada como sigue:

$$y_2 = x'_2D1 + x'_2D0. \quad (3.2)$$

- *Ejercicios isotónicos* (y_3). Esta terapia también depende de la variable x_2 y esta condición es prescrita cuando la fuerza articular es reportada como normal. Entonces, de acuerdo con la Tabla 3.3 la condición es prescrita cuando $x_2D1 = 1$ **AND** $(\cdot) x_2D0 = 1$; por lo tanto, la función es como sigue:

$$y_3 = x_2D1 \cdot x_2D0. \quad (3.3)$$

- *Ejercicios de estiramiento* (y_4). Esta terapia es prescrita si los movimientos articulares (x_1) son incompletos o ambos limitación de movimientos (x_3) o contractura (x_6) están presentes:

$$y_4 = x_1 + x_3 + x_6. \quad (3.4)$$

- *Ejercicios de propiocepción* (y_5). Esta terapia es prescrita si la evaluación clínica reporta limitación de movimiento, sensibilidad alterada, marcha disbásica o no hay estabilidad. La relación es como sigue:

$$y_5 = x_3 + x_9 + x_{10} + x_{11}. \quad (3.5)$$

- *Ejercicios para la marcha* (y_6). Estos ejercicios son prescritos cuando una marcha disbásica es reportada en el expediente clínico. La función es como sigue:

$$y_6 = x_{10}. \quad (3.6)$$

- *Masaje anti-adherente* (y_7). Si en la evaluación clínica se reporta que la herida de la articulación afectada es adherida, entonces esta terapia es prescrita. La función correspondiente es como sigue:

$$y_7 = x_7. \quad (3.7)$$

- *Masaje anti-edema* (y_8). Esta terapia depende de dos variables politómicas: dolor x_4 y edema x_5 cuya discretización está en la Tabla 3.3. La terapia es

prescrita solo si no hay dolor o muy poco dolor y si el edema es moderado o severo. Considerando todas las posibles combinaciones de x_4 y x_5 , la función que representa a y_8 es definida; sin embargo, debido a la extensión de la función resultante, es simplificada con los mapas de Karnaugh. La función simplificada que cumple con estas condiciones es representada como sigue:

$$y_8 = x_4' D1 \cdot x_5 D1. \quad (3.8)$$

donde x_4' representa el valor lógico negado de la variable discreta x_4 .

- *Masaje descontracturante* (y_9). Esta terapia depende de la variable politómica x_4 y de la variable dicotómica x_6 cuya discretización está en la Tabla 3.3. Esta terapia es recomendada en casos donde no hay dolor o el dolor es leve y si se reporta contractura. La función que cumple con estas condiciones también fue simplificada usando los mapas de Karnaugh, así que la expresión que la representa es como sigue:

$$y_9 = x_4' D1 \cdot x_6. \quad (3.9)$$

- *Ultrasonido de profundidad superficial* (y_{10}). Esta terapia es prescrita si en la evaluación clínica se reporta dolor moderado o severo, considerando la discretización de x_4 en la Tabla 3.3.

$$y_{10} = x_4 D1. \quad (3.10)$$

- *Cambios térmicos* (y_{11}). Esta terapia es prescrita si cualquier estado de dolor, edema o cambios tróficos está presente en la evaluación clínica. De acuerdo con la discretización de x_4 y x_5 en la Tabla 3.3 la función es como sigue:

$$y_{11} = x_4 D1 + x_4 D0 + x_5 D1 + x_5 D0 + x_8. \quad (3.11)$$

- *Terapia interferencial para el edema* (y_{12}). Esta terapia es prescrita para cualquier nivel de edema (ver la discretización en la Tabla 3.3):

$$y_{12} = x_5 D1 + x_5 D0. \quad (3.12)$$

- *Terapia interferencial para el dolor* (y_{13}). Esta terapia es prescrita cuando el dolor es registrado como moderado o severo; el cual en la práctica clínica es considerado arriba de nivel 5. De acuerdo con la discretización de x_4 en la Tabla 3.3 la función es como sigue:

$$y_{13} = x_4 D1 \cdot x_4 D0. \quad (3.13)$$

- *Terapia interferencial para consolidación ósea* (y_{14}). Esta terapia es prescrita cuando no hay consolidación ósea (x_{12}). Por lo tanto, la relación es como sigue:

$$y_{14} = x_{12}. \quad (3.14)$$

El conjunto de funciones lógicas dadas por (3.1)-(3.14) definen la base del sistema propuesto de prescripción asistida por computadora.

3.3. Implementación numérica

El sistema experto definido por las funciones lógicas (3.1)-(3.14) fue implementado mediante el software Matlab® versión 2021a. El algoritmo 1 fue probado usando la base de datos recolectada en el hospital como se describió en este capítulo en la sección 3.1.

La Figura 3.1 muestra los resultados de la evaluación del sistema experto propuesto para todos los expedientes clínicos recolectados. La primera columna incluye el total de número de expedientes clínicos y el resto de las columnas ilustran la prescripción clínica recomendada por el sistema. Cada terapia (y_i para $i = 1, \dots, 14$) es representada por una celda, la cual es coloreada con gris oscuro si el sistema experto recomienda la prescripción de una terapia ($y_i = 1$); de otra forma, la celda permanece blanca ($y_i = 0$).

Para analizar la recurrencia de las terapias prescritas, la Figura 3.2 presenta un histograma de la frecuencia de prescripción de cada terapia.

Algoritmo 1. Sistema experto para rehabilitación de fractura de tobillo.

Inicio: Datos de entrada representados por la condición clínica del paciente.

1. $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10} \ x_{11} \ x_{12}]^T$.

Declaración de variables de entrada:

2: $X(1) = x_1$; $X(2) = x_2 D1$; $X(3) = x_2 D0$; $X(4) = x_3$; $X(5) = x_4 D1$; $X(6) = x_4 D0$;

$X(7) = x_5 D1$; $X(8) = x_5 D0$; $X(9) = x_6$; $X(10) = x_7$; $X(11) = x_8$; $X(12) = x_9$;

$X(13) = x_{10}$; $X(14) = x_{11}$; $X(15) = x_{12}$;

Funciones para la prescripción: para cada terapia y_i para $i = 1, \dots, 14$.

3: $y_1 = X(4)$ **OR** $X(1)$;

4: $y_2 = X(2)'$ **OR** $X(3)'$;

5: $y_3 = X(2)$ **AND** $X(3)$;

6: $y_4 = X(1)$ **OR** $X(4)$ **OR** $X(9)$;

7: $y_5 = X(4)$ **OR** $X(12)$ **OR** $X(13)$ **OR** $X(14)$;

8: $y_6 = X(13)$;

9: $y_7 = X(10)$;

10: $y_8 = X(5)'$ **AND** $X(7)$;

11: $y_9 = X(5)'$ **AND** $X(9)$;

12: $y_{10} = X(5)$;

13: $y_{11} = X(5)$ **OR** $X(6)$ **OR** $X(7)$ **OR** $X(8)$ **OR** $X(11)$;

14: $y_{12} = X(7)$ **OR** $X(8)$;

15: $y_{13} = X(5)$ **AND** $X(6)$;

16: $y_{14} = X(15)$;

Return: Datos de salida representados por las terapias prescritas.

17: $y = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4 \ y_5 \ y_6 \ y_7 \ y_8 \ y_9 \ y_{10} \ y_{11} \ y_{12} \ y_{13} \ y_{14}]^T$.

Expedientes clínicos	Terapias													
	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}
C1														
C2														
C3														
C4														
C5														
C6														
C7														
C8														
C9														
C10														
C11														
C12														
C13														
C14														
C15														
C16														
C17														
C18														
C19														
C20														
C21														
C22														
C23														
C24														
C25														
C26														
C27														
C28														
C29														
C30														
C31														
C32														
C33														
C34														

Figura 3.1: Evaluación del sistema experto definido por las funciones lógicas (3.1)-(3.14). El sistema se probó usando los datos de entrada de los expedientes clínicos (primera columna). Para el resto de las columnas, la celda de cada terapia se colorea en gris oscuro si el sistema experto recomienda prescribir la terapia ($y_i = 1$); de otra manera, la celda permanece de color blanco ($y_i = 0$).

3.4. Expedientes clínicos virtuales

La base de datos fue complementada con un conjunto de expedientes clínicos virtuales para validar el desempeño del sistema propuesto de prescripción asistida por computadora. El objetivo fue generar 90 expedientes clínicos virtuales que comparten características estadísticas con los 34 expedientes clínicos reales seleccionados de acuerdo con el procedimiento descrito en la subsección de recolección de datos. El procedimiento usado para generar los expedientes clínicos virtuales fue como sigue:

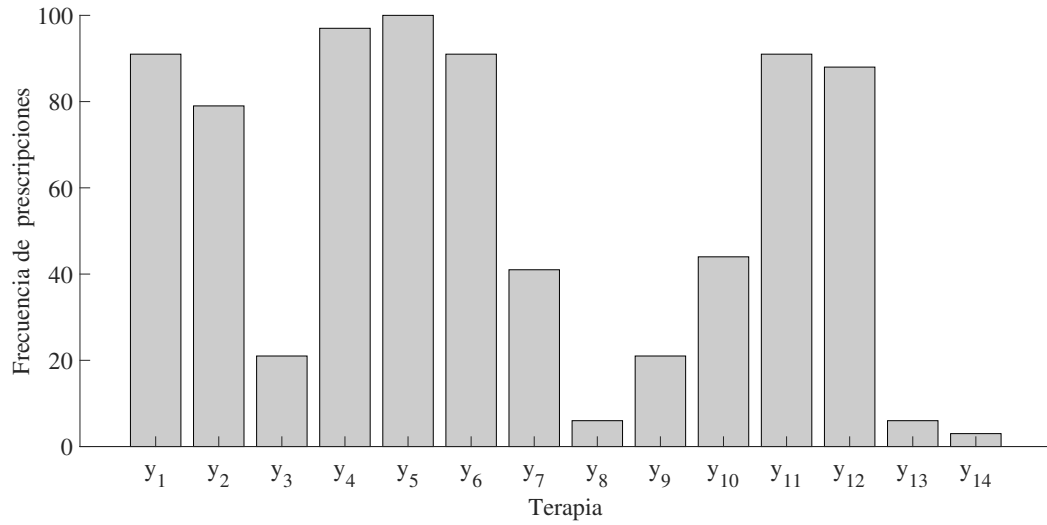


Figura 3.2: Frecuencia de prescripción de terapias para 34 casos evaluados con el sistema experto.

El conjunto de 34 expedientes clínicos reales es usado como dato inicial y forma una distribución normal y cada elemento es representado por (x_s) . El objetivo fue generar variables de entrada virtuales (x_v) que compartan la media y la desviación estándar con el conjunto de los expedientes clínicos reales. El método bootstrap [74] es usado para el remuestreo de un conjunto de expedientes clínicos reales con reemplazo para obtener un conjunto de variables aleatorias con una distribución normal. En este caso, fue generada una población de 10,000 variables aleatorias (x_r) con una distribución normal y el método proporcionó la media (x_m) y la desviación estándar (σ_x) para el nuevo conjunto los cuales incluyen los reales x_s . Usando estas estadísticas, nuevos datos virtuales (x_n) son generados de x_r de acuerdo con la siguiente expresión:

$$x_n = x_r \sigma_x + x_m. \quad (3.15)$$

Como se mencionó previamente, la variable de entrada real x_s es binaria; así, x_n de 3.15 debe ser binarizada. El umbral binario para cada componente $x_{v,i}$ para $i = 1, \dots, 12$ depende de la escala definida en la Tabla 3.3 como se ilustró en la Figura 3.3. Así, 90 variables virtuales x_v fueron seleccionadas de una manera aleatoria para formar un conjunto de expedientes clínicos virtuales. Entonces, pa-

ra propósitos de validación, fueron considerados una base de datos que consistió de 10 expedientes clínicos reales y 90 expedientes virtuales generados usando la metodología anterior, con un total de 100 expedientes clínicos.

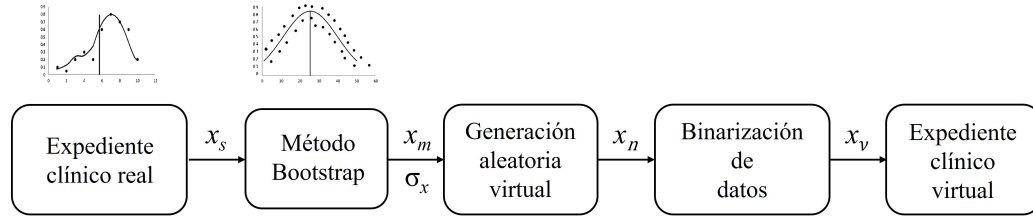


Figura 3.3: Procedimiento para generar expedientes clínicos virtuales. Los expedientes clínicos virtuales fueron generados de: (i) el conjunto de datos de los expedientes clínicos reales, (ii) usando el método bootstrap para obtener población remuestreada, (iii) un generador de datos aleatorios definido en 3.15 y un proceso de binarización considerando el límite de cada componente de x_v de acuerdo con la Tabla 3.3.

Capítulo 4

Validación clínica

4.1. Validación de expedientes clínicos virtuales

Los expedientes clínicos virtuales generados y representados por el procedimiento en la Figura 3.3 fueron validados por un especialista en el Departamento de Medicina del Deporte y Rehabilitación del hospital “Dr. José Eluterio González”, Universidad de Nuevo León, en Monterrey, Nuevo León, México. El especialista analizó las variables de entrada x_v para cada expediente clínico virtual. Cuando el especialista identificó una inconsistencia (por ejemplo, diferencias entre el dato generado a través del método virtual y el conocimiento del especialista), el especialista recomendó hacer ajustes al dato no congruente. Un ejemplo de este procedimiento es ilustrado en la Tabla 4.1, la cual presenta datos de un expediente clínico virtual, donde el valor de x_{v1} representa los movimientos articulares incompletos, este valor fue revisado por el especialista quien reportó que no había congruencia con la marcha eubásica y la limitación de movimiento. En este caso, la sugerencia del especialista fue cambiar el valor de x_{v1} de movimientos articulares incompletos a movimientos articulares completos, para ser congruente con el expediente clínico.

Tabla 4.1: Validación de la tercera cita de un expediente clínico virtual. El valor “**Incompleto**” de x_{v1} en la tercer columna fue cambiado a “**Completo**” para mantener congruencia con una típica condición clínica de un paciente en la tercera cita de un PRE.

<i>Expediente clínico virtual</i>			<i>Condición clínica</i>
<i>Ajuste</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>	
Movimientos articulares	x_{v1}	Incompleto	Completo
Fuerza	x_{v2}	4/5	-
Limitación de movimiento	x_{v3}	No presente	-
Dolor	x_{v4}	2/10	-
Edema	x_{v5}	x	-
Contractura	x_{v6}	Presente	-
Herida	x_{v7}	No adherida	-
Cambios tróficos	x_{v8}	No presente	-
Sensibilidad	x_{v9}	No alterada	-
Marcha	x_{v10}	Eubásica	-
Estabilidad	x_{v11}	Presente	-
Consolidación ósea	x_{v12}	Presente	-

Del conjunto completo de expedientes clínicos, sólo 15 (16.6%) fueron inconsistentes. Las inconsistencias fueron observadas en x_{v1} , x_{v3} , x_{v9} , x_{v10} y x_{v11} . La frecuencia de las inconsistencias por variable de entrada virtual es mostrada en la Figura 4.1. Una vez que fueron ajustados y validados los expedientes clínicos virtuales, se procedió a la validación del sistema de prescripción automatizado propuesto.

4.2. Validación del sistema de prescripción automatizada asistido por computadora.

La validación del sistema experto propuesto consistió en la comparación de la prescripción médica hecha por el especialista y la prescripción automatizada calculada por el sistema experto. En ambos casos los datos de entrada fueron los expedientes clínicos de la base de datos. Las prescripciones médicas fueron recolectadas en sesiones durante las cuales el especialista accedió a la base de datos y

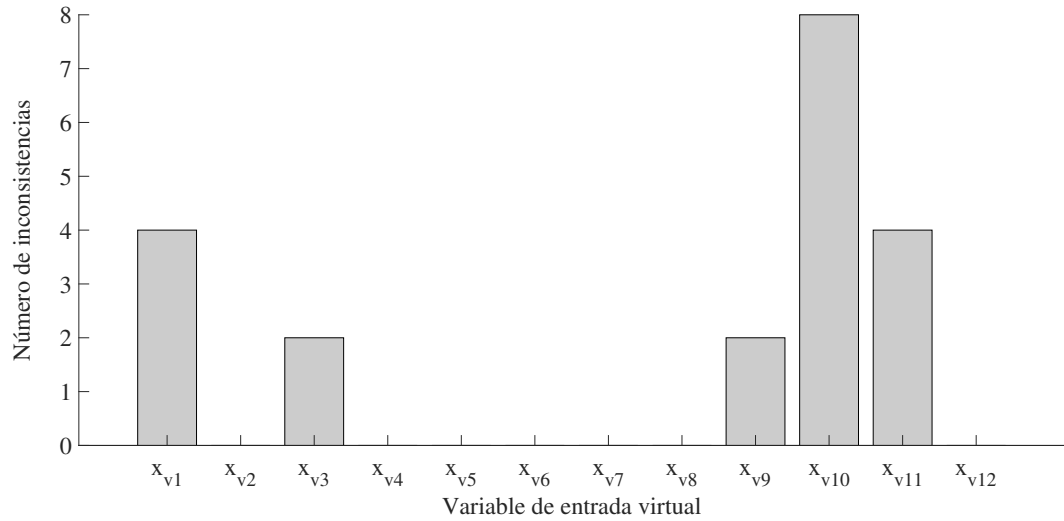


Figura 4.1: Variables de entrada virtual que presentaron inconsistencias en el proceso de validación de los expedientes clínicos virtuales.

preparó las prescripciones en función de los datos registrados en cada expediente clínico. la base de datos completa (100 expedientes clínicos) fue mostrada al especialista por medio de una selección aleatoria simple ciego. Las prescripciones automatizadas fueron calculadas usando el algoritmo 1, el cual fue alimentado con la misma base de datos proporcionados al especialista. La validación del sistema experto fue validado usando una matriz de confusión (C.M.), el cual es un método comúnmente utilizado para medir la exactitud de un algoritmo; en la Figura 4.2 se muestra este proceso. Para complementar estas métricas se incluyó el F-score. La C.M. es una tabla de error que sirve como una herramienta estadística para analizar observaciones en pares [75] y el F-score es una métrica para evaluar la exactitud de un modelo de clasificación binaria [76]; estas incluyen el cálculo de las métricas para exactitud, precisión, sensibilidad y especificidad [62]. Los elementos de la C.M. se calcularon con los resultados de la prescripción médica y la prescripción automatizada, el ejemplo de un expediente clínico con ambas prescripciones se puede ver en la Figura 4.3 donde se muestra en la fila color gris una diferencia entre la prescripción médica y la prescripción automatizada. Considerando los 100 expedientes clínicos de la base de datos y las 14 diferentes terapias a ser prescritas ($y = [y_1, y_2, \dots, y_{14}]^T$), un total de 1400 prescripciones fueron he-

chas por el especialista y el mismo número de prescripciones fueron calculadas por el sistema experto. El total de número de casos por cada elemento de la C.M. es mostrado en la Tabla 4.2, los cuales fueron 759 VPs, 10 FPs, 27 FNs y 604 VNs. Con estos datos fueron calculadas las métricas para validar el sistema experto con los siguientes resultados: 97.4% exactitud, 98.7% precisión, 96.6% sensibilidad, 98.4% especificidad y 97.6% F-score. Estos datos son resumidos en la Tabla 4.3.

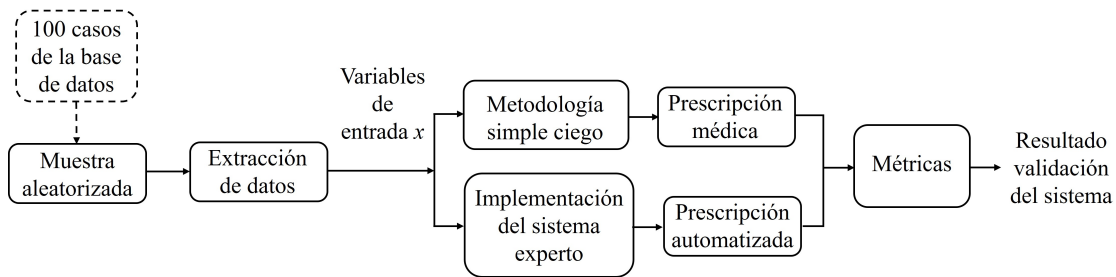


Figura 4.2: Obtención de la prescripción médica, prescripción automatizada y cálculo de métricas para la validación del sistema experto propuesto.

Condiciones clínicas			Prescripción	
Variables de entrada			Médica	Automatizada
ROMs	x_1	Incompletos		
Fuerza	x_2	4/5		
Limitación de movimiento	x_3	No		
Dolor	x_4	3/10		
Edema	x_5	xx		
Contractura	x_6	Si		
Herida	x_7	Adherida		
Cambios tróficos	x_8	No		
Sensibilidad	x_9	No alterada		
Marcha	x_{10}	Disbásica		
Estabilidad	x_{11}	Inestabilidad		
Consolidación	x_{12}	Consolidación		
Variables de salida				
y_1	Ejercicios de movilidad		1	1
y_2	Ejercicios isométricos		1	1
y_3	Ejercicios isotónicos		0	0
y_4	Ejercicios de estiramiento		1	1
y_5	Propiocepción		1	1
y_6	Reeducación de la marcha		1	1
y_7	Masaje para la herida		1	1
y_8	Masaje antiedema		1	0
y_9	Masaje descontracturante		0	0
y_{10}	Ultrasonido		1	1
y_{11}	Cambios térmicos: frío y calor		1	1
y_{12}	TI para el edema		1	1
y_{13}	TI para el dolor		0	0
y_{14}	TI para la consolidación		0	0

Figura 4.3: Ejemplo de caso clínico para la validación del sistema propuesto. Datos recolectados de la prescripción médica y datos calculados de la prescripción automatizada.

El índice de confiabilidad del sistema experto también fue incluido en la validación. Este fue calculado considerando el número de coincidencias y discrepancias entre pares de la prescripción médica y automatizada. La Figura 4.4 muestra

Tabla 4.2: Referencia cruzada de la prescripción automática y médica.

		<i>Prescripción médica</i>		<i>Total casos</i>
		1	0	
<i>Prescripción automatizada</i>	1	759	27	786
	0	10	604	614
<i>Total casos</i>		769	631	1400

Tabla 4.3: Métricas para validar el sistema experto.

<i>Métricas</i>	<i>Índices</i>
Exactitud	97.4%
Precisión	98.7%
Sensibilidad	96.6%
Especificidad	98.4%

el número de discrepancias entre las prescripciones médicas y automatizadas para cada terapia, donde y_2 , y_3 , y_5 , y_6 , y_7 , y_{11} , y_{12} y y_{14} no tuvieron discrepancias. El resto de las prescripciones acumularon 32 discrepancias, resultando en 2.29% de las 1400 prescripciones. Por lo tanto, la confiabilidad del sistema experto es 97.71%.

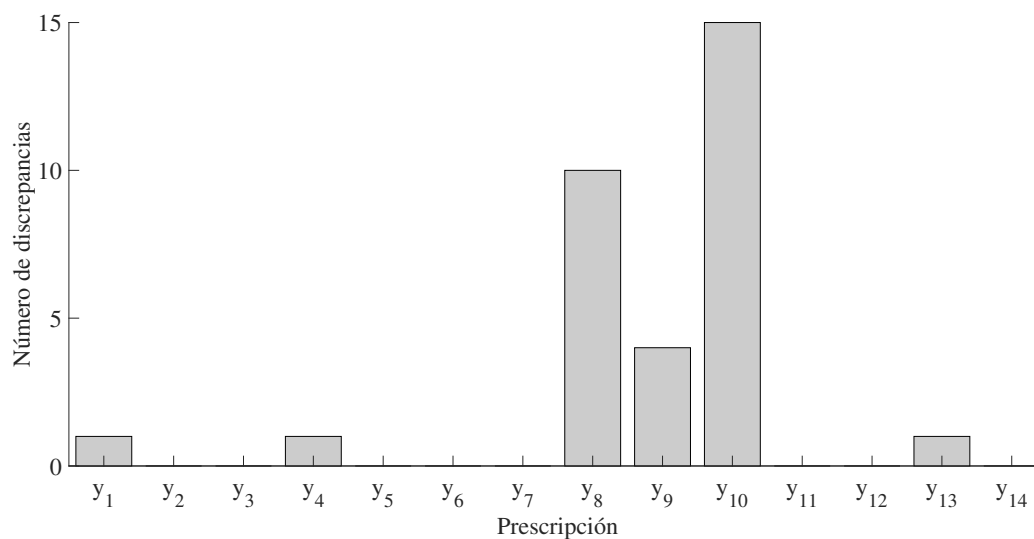


Figura 4.4: Número de discrepancias entre la prescripciones médicas y automatizadas considerando la base de datos completa de los expedientes clínicos.

Capítulo 5

Discusión

Como se discutió en el capítulo 2, hay un actual reto en el desarrollo de sistemas de prescripción asistidos por computadora, por lo tanto, este estudio busca contribuir a la sistematización y cuantificación del proceso de la toma de decisión de los especialistas en programas de rehabilitación para fracturas de tobillo. Las contribuciones de este trabajo son las siguientes: (1) El análisis retrospectivo de datos de los expedientes clínicos de pacientes enrolados en un programa de rehabilitación de fractura de tobillo. (2) Representación cuantitativa del conocimiento de los especialistas respecto a la prescripción de terapias. (3) Desarrollo de una metodología computacional que sintetiza la información de los puntos previos para automatizar la prescripción. Estos tres puntos son ilustrados en el diagrama de bloques en la Figura 2.11. Lo mencionado arriba, proporciona una metodología computacional general, la cual podría ser utilizada en el diseño de sistemas de prescripción de terapias en diferentes tipos de condiciones, con la definición y cuantificación apropiada de las variables de entrada y salida, así como la definición de las reglas basadas en el conocimiento del especialista. En el caso de estudio, la base de datos se obtuvo del análisis de los expedientes clínicos lo que proporcionó las variables de entrada y salida x , y (Tablas 2.2 y 2.3). La cuantificación y el reconocimiento del especialista resultaron en las relaciones definidas por las funciones dadas por (3.1)-(3.14). El algoritmo 1 presenta la metodología computacional propuesta. Los resultados de la evaluación del algoritmo permitieron calcular la frecuencia de prescripción de cada terapia (Figura

3.2) presentando que algunas terapias se prescriben con menos frecuencia que otras; por ejemplo, ejercicios isotónicos (y_3) y masaje descontracturante (y_9) fueron prescritas en 21 % de los expedientes clínicos; masaje antiedema (y_8) y terapia interferencial para el dolor (y_{13}) fueron prescritas el 6 % de las veces y la terapia interferencial para consolidación ósea (y_{14}) fue prescrita sólo en el 3 % de los casos. Esto demuestra una diferencia entre la prescripción clínica y la prescripción asistida por computadora, lo cual nos brinda la oportunidad de identificar elementos clave del proceso para optimizarlo y podría ayudar a planear el uso de recursos en un centro de rehabilitación en términos de equipamiento y disponibilidad de personal especializado. Para validar el sistema experto, expedientes clínicos virtuales fueron propuestos y validados por un especialista para confirmar su congruencia con los expedientes clínicos reales. 75 expedientes clínicos virtuales (83.4%) fueron congruentes con las condiciones reales de los pacientes. El resto de los 15 expedientes clínicos presentaron inconsistencias en variables específicas, las cuales se resumieron en la Figura 4.1, donde la marcha (x_{v10}) fue la variable que más seguido presentó inconsistencias durante la validación clínica. Utilizando la base de datos completa, validamos el desempeño del sistema experto. Las inconsistencias entre las prescripciones automatizadas y las clínicas fueron cuantificadas para cada terapia, como se ilustra en la Figura 4.4. El número más grande de inconsistencias fue observado para el masaje anti-edema (y_8), masaje descontracturante (y_9) y ultrasonido (y_{10}); esto es debido a que estas terapias dependen de la variable de entrada del dolor (x_4), que en la práctica clínica, los niveles de dolor son altamente subjetivos, lo cual incrementa la variabilidad en la prescripción. El haber extraído el conjunto completo de prescripciones y haber cuantificado las congruencias e inconsistencias entre las prescripciones automatizadas y las clínicas, indica que la prescripción del sistema experto tuvo un 97.71 % de confiabilidad.

Adicionalmente, la C.M. fue utilizada para cuantificar la exactitud (97.4%), precisión (98.7%), sensibilidad (96.6%), especificidad (98.4%) y F-score (97.6%) del sistema experto. Los resultados de la prescripción del sistema experto aquí propuesto son consistentes con lo reportado previamente en sistemas asistidos por computadora en aplicaciones médicas. Por ejemplo, Polat *et al.* presentaron un sistema experto para el diagnóstico de la diabetes el cual tuvo un 89.47% de

exactitud [60]. Otros estudios de sistemas expertos reportados para diagnosticar cáncer de mama con 97 % especificidad y 76 % de sensibilidad [61]; enfermedad de la arteria coronaria con 93.3 % de exactitud, 93.3 % de especificidad y 93.2 % de sensibilidad [62]; enfermedad de la tiroide con 89 % de exactitud [64]; leucemia con 94 % de exactitud; y desórdenes musculoesqueléticos con 86.7 % de exactitud [57]. Por lo tanto, los trabajos previos reportan principalmente la exactitud del sistema experto y el valor de nuestro sistema se encuentra en estos rangos de exactitud reportados. La especificidad y sensibilidad sólo fueron reportados en dos estudios [61], [62] y sus valores fueron comparables con los resultados del sistema experto reportado en este trabajo.

Este trabajo puede ser utilizado como precedente para futuras líneas de investigación acerca del tratamiento de la prescripción de terapias para distintas patologías en el campo de la medicina, debido a que muestra la sintetización del procedimiento de un PRF para fractura de tobillo. El próximo reto de esta investigación es llevar a cabo una validación con una muestra representativa de profesionales clínicos para respaldar el uso de este sistema de prescripción automatizada en la práctica clínica como herramienta de apoyo a las decisiones.

Capítulo 6

Conclusiones

La consolidación del diagnóstico asistido por computadora ha dado lugar al desarrollo de sistemas expertos en otras áreas de toma de decisiones médicas en la práctica clínica, tal como en la prescripción de terapias y tratamientos. En el caso de un PRF; identificar la estructura y elementos del proceso de prescripción, incluyendo fuentes de información y el razonamiento de los especialistas, ha permitido proponer un sistema experto como un sistema de prescripción asistido por computadora para prescribir automáticamente las terapias de rehabilitación. Esta prescripción está basada sobre los datos de las condiciones biomecánicas de pacientes registrados en expedientes clínicos.

El alcance de este estudio fue sintetizar el procedimiento de un programa de rehabilitación física como un proceso iterativo y definir los elementos de un sistema de prescripción asistido por computadora que puede ser utilizado como una herramienta computacional para apoyo a las decisiones médicas. El sistema aquí propuesto tiene un desempeño aceptable de acuerdo con las métricas reportadas en la literatura para sistemas asistidos por computadora en otras aplicaciones médicas para el proceso de toma de decisiones. Este caso de estudio podría ser la base de un sistema para aprendizaje automático que especifica y mejora las prescripciones clínicas basadas en información proporcionada por los especialistas. Como se estableció en la discusión del documento, el sistema fue validado con expedientes clínicos virtuales, incluyendo pruebas en pacientes hospitalizados y ambulatorios con pacientes enrolados en un programa de rehabilitación física.

Bibliografía

- [1] Mingming Zhang, T Claire Davies, and Shane Xie. Effectiveness of robot-assisted therapy on ankle rehabilitation—a systematic review. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 10(1):30, 2013.
- [2] Paul A Matthews, Brigitte E Scammell, Arfan Ali, Timothy Coughlin, Jessica Nightingale, Tanvir Khan, and Ben J Ollivere. Early motion and directed exercise (emade) versus usual care post ankle fracture fixation: study protocol for a pragmatic randomised controlled trial. *Trials*, 19(1):304, 2018.
- [3] LG Ibarra, VH Segura-García, DD Chávez-Arias, O Borunda-Falcón, T Chávez-Heres, C Ridaura-Valencia, and SI Macías-Hernández. Las enfermedades y traumatismos del sistema músculo esquelético. un análisis del instituto nacional de rehabilitación de méxico, como base para su clasificación y prevención, 2013.
- [4] Rebecca S Kearney, Rebecca McKeown, Daniel Gallacher, Jaclyn Brown, Dipesh Mistry, Nick Parsons, Jonathan Young, and Matthew Costa. Ankle injury rehabilitation (air): a feasibility randomised controlled trial comparing functional bracing to plaster cast in the treatment of adult ankle fractures. *Pilot and feasibility studies*, 5(1):55, 2019.
- [5] Saurabh Odak, Raju Ahluwalia, Puthanveetil Unnikrishnan, Michael Hennessy, and Simon Platt. Management of posterior malleolar fractures: a systematic review. *The Journal of Foot and Ankle Surgery*, 55(1):140–145, 2016.
- [6] Edwin Daniel Oña Simbaña, Patricia Sánchez-Herrera Baeza, Alberto Jardón Huete, and Carlos Balaguer. Review of automated systems for upper limbs

- functional assessment in neurorehabilitation. *IEEE Access*, 7:32352–32367, 2019.
- [7] Paul Cordo, Helmi Lutsep, Linda Cordo, W Geoffrey Wright, Timothy Caciatore, and Rachel Skoss. Assisted movement with enhanced sensation (ames): coupling motor and sensory to remediate motor deficits in chronic stroke patients. *Neurorehabilitation and neural repair*, 23(1):67–77, 2009.
 - [8] Oscar Junior Castro Valdez, María Elena Haro Acosta, and Karla Adelina Quiñones Montelongo. Apego a las guías de duración de la incapacidad laboral por patología en fracturas de tobillo. *Revista Cubana de Salud y Trabajo*, 20(1):43–46, 2019.
 - [9] Enrique Sánchez, Juan Martínez, Fausto García, Miguel Flores, and Hellen Aguilar. Tratamiento de la fractura de tobillo en el adulto. E. Sánchez, J. Martínez, F. García, M. Flores, & H. Aguilar, *Catálogo maestro de guías de práctica clínica Instituto Mexicano del Seguro*, pages 1–51, 2010.
 - [10] Terradillos García and M^a Jesús. Guía de valoración de incapacidad laboral temporal para médicos de atención primaria. *Medicina y Seguridad del Trabajo*, 62(242):1–1, 2016.
 - [11] Stanley Hoppenfeld and Vasantha L Murthy. *Treatment and rehabilitation of fractures*. Lippincott Williams & Wilkins, 2000.
 - [12] Stuart A Bullock, Georgina M Allen, Marion S Watson, and David J Wilson. Predicting poor outcome from simple ankle injuries: a prospective cohort study. *The British Journal of Radiology*, 91(1081):20170213, 2018.
 - [13] World Health Organization. *Neurological disorders: public health challenges*. World Health Organization, 2006.
 - [14] Yalin Liao, Aleksandar Vakanski, Min Xian, David Paul, and Russell Baker. A review of computational approaches for evaluation of rehabilitation exercises. *Computers in biology and medicine*, 119:103687, 2020.

- [15] *Rehabilitation protocol for ankle fracture with ORIF*. Massachusetts general Hospital, Boston, MA, USA, 2021.
- [16] Prashant K Jamwal, Shahid Hussain, Nazim Mir-Nasiri, Mergen H Ghayesh, and Sheng Q Xie. Tele-rehabilitation using in-house wearable ankle rehabilitation robot. *Assistive Technology*, 30(1):24–33, 2018.
- [17] Qing Miao, Mingming Zhang, Congzhe Wang, and Hongsheng Li. Towards optimal platform-based robot design for ankle rehabilitation: The state of the art and future prospects. *Journal of healthcare engineering*, 2018, 2018.
- [18] Mingming Zhang, Sheng Q Xie, Xiaolong Li, Guoli Zhu, Wei Meng, Xiaolin Huang, and Allan J Veale. Adaptive patient-cooperative control of a compliant ankle rehabilitation robot (carr) with enhanced training safety. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(2):1398–1407, 2017.
- [19] Marina Vallés, José Casalilla, Ángel Valera, Vicente Mata, Álvaro Page, and Miguel Díaz-Rodríguez. A 3-prs parallel manipulator for ankle rehabilitation: towards a low-cost robotic rehabilitation. *Robotica*, 35(10):1939–1957, 2017.
- [20] Congzhe Wang, Yuefa Fang, Sheng Guo, and Yaqiong Chen. Design and kinematical performance analysis of a 3-rus/rrr redundantly actuated parallel mechanism for ankle rehabilitation. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 5(4), 2013.
- [21] Yun-Ho Tsoi, Shane Q Xie, and Andrew E Graham. Design, modeling and control of an ankle rehabilitation robot. In *Design and Control of Intelligent Robotic Systems*, pages 377–399. Springer, 2009.
- [22] Guoli Zhu, Xiangfeng Zeng, Mingming Zhang, Shane Xie, Wei Meng, Xiaolin Huang, and Qun Xu. Robot-assisted ankle rehabilitation for the treatment of drop foot: a case study. In *2016 12th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*, pages 1–5. IEEE, 2016.

- [23] Kartik Bharadwaj, Thomas G Sugar, James B Koeneman, and Edward J Koeneman. Design of a robotic gait trainer using spring over muscle actuators for ankle stroke rehabilitation. 2005.
- [24] Haoyong Yu, Sunan Huang, Gong Chen, Yongping Pan, and Zhao Guo. Human–robot interaction control of rehabilitation robots with series elastic actuators. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(5):1089–1100, 2015.
- [25] Yong-Lae Park, Bor-rong Chen, Néstor O Pérez-Arancibia, Diana Young, Leia Stirling, Robert J Wood, Eugene C Goldfield, and Radhika Nagpal. Design and control of a bio-inspired soft wearable robotic device for ankle–foot rehabilitation. *Bioinspiration & biomimetics*, 9(1):016007, 2014.
- [26] M Girone, Grigore Burdea, Mourad Bouzit, V Popescu, and Judith E Deutsch. A stewart platform-based system for ankle telerehabilitation. *Autonomous robots*, 10(2):203–212, 2001.
- [27] Jungwon Yoon, Jeha Ryu, and Kil-Byung Lim. Reconfigurable ankle rehabilitation robot for various exercises. *Journal of Robotic Systems*, 22(S1):S15–S33, 2006.
- [28] Wei Meng, Quan Liu, Mingming Zhang, Bo Sheng, Zude Zhou, Qingsong Ai, and Shane Xie. Robot-assisted ankle rehabilitation training on an adult with cerebral palsy: a case report. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, volume 57199, page V009T07A006. American Society of Mechanical Engineers, 2015.
- [29] Prashant K Jamwal, Sheng Q Xie, Shahid Hussain, and John G Parsons. An adaptive wearable parallel robot for the treatment of ankle injuries. *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, 19(1):64–75, 2012.
- [30] Jody Alessandro Saglia, Nikolaos G Tsagarakis, Jian S Dai, and Darwin G Caldwell. A high-performance redundantly actuated parallel mechanism for ankle rehabilitation. *The International Journal of Robotics Research*, 28(9):1216–1227, 2009.

- [31] Mingming Zhang, Jinghui Cao, Guoli Zhu, Qing Miao, Xiangfeng Zeng, and Sheng Q Xie. Reconfigurable workspace and torque capacity of a compliant ankle rehabilitation robot (carr). *Robotics and Autonomous Systems*, 98:213–221, 2017.
- [32] Zhihao Zhou, Yao Sun, Ninghua Wang, Fan Gao, Kunlin Wei, and Qining Wang. Robot-assisted rehabilitation of ankle plantar flexors spasticity: a 3-month study with proprioceptive neuromuscular facilitation. *Frontiers in neurorobotics*, 10:16, 2016.
- [33] Yupeng Ren, Yi-Ning Wu, Chung-Yong Yang, Tao Xu, Richard L Harvey, and Li-Qun Zhang. Developing a wearable ankle rehabilitation robotic device for in-bed acute stroke rehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 25(6):589–596, 2016.
- [34] Anindo Roy, Hermano Igo Krebs, Dustin J Williams, Christopher T Bever, Larry W Forrester, Richard M Macko, and Neville Hogan. Robot-aided neurorehabilitation: a novel robot for ankle rehabilitation. *IEEE transactions on robotics*, 25(3):569–582, 2009.
- [35] Congzhe Wang, Yuefa Fang, and Sheng Guo. Multi-objective optimization of a parallel ankle rehabilitation robot using modified differential evolution algorithm. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 28(4):702–715, 2015.
- [36] William Bolton and Francisco José Rodríguez Ramírez. *Ingeniería de control*. Alfaomega Mexico, 2001.
- [37] Oliver Faust, U Rajendra Acharya, and Toshiyo Tamura. Formal design methods for reliable computer-aided diagnosis: a review. *IEEE reviews in biomedical engineering*, 5:15–28, 2012.
- [38] Athanasios V Vasilakos, Yu Tang, Yuanzhe Yao, et al. Neural networks for computer-aided diagnosis in medicine: a review. *Neurocomputing*, 216:700–708, 2016.

- [39] Juri Yanase and Evangelos Triantaphyllou. A systematic survey of computer-aided diagnosis in medicine: past and present developments. *Expert Systems with Applications*, 138:112821, 2019.
- [40] Kenji Suzuki. A review of computer-aided diagnosis in thoracic and colonic imaging. *Quantitative imaging in medicine and surgery*, 2(3):163, 2012.
- [41] Yuliana Jiménez-Gaona, María José Rodríguez-Álvarez, and Vasudevan Lakshminarayanan. Deep-learning-based computer-aided systems for breast cancer imaging: a critical review. *Applied Sciences*, 10(22):8298, 2020.
- [42] Shijun Wang, Karen Burt, Baris Turkbey, Peter Choyke, and Ronald M Summers. Computer aided-diagnosis of prostate cancer on multiparametric mri: a technical review of current research. *BioMed research international*, 2014, 2014.
- [43] El-Sayed A El-Dahshan, Heba M Mohsen, Kenneth Revett, and Abdel-Badeeh M Salem. Computer-aided diagnosis of human brain tumor through mri: a survey and a new algorithm. *Expert systems with Applications*, 41(11):5526–5545, 2014.
- [44] Muhammad Adam, Eddie YK Ng, Jen Hong Tan, Marabelle L Heng, Jasper WK Tong, and U Rajendra Acharya. Computer aided diagnosis of diabetic foot using infrared thermography: a review. *Computers in biology and medicine*, 91:326–336, 2017.
- [45] Muthu Rama Krishnan Mookiah, U Rajendra Acharya, Chua Kuang Chua, Choo Min Lim, EYK Ng, and Augustinus Laude. Computer-aided diagnosis of diabetic retinopathy: a review. *Computers in biology and medicine*, 43(12):2136–2155, 2013.
- [46] Norah Asiri, Muhammad Hussain, Fadwa Al Adel, and Nazih Alzaidi. Deep learning based computer-aided diagnosis systems for diabetic retinopathy: a survey. *Artificial intelligence in medicine*, 99:101701, 2019.
- [47] O Bennett Walton, Robert B Garoon, Christina Y Weng, Jacob Gross, Alex K Young, Kathryn A Camero, Haoxing Jin, Petros E Carvounis, Robert E Coffee,

- and Yvonne I Chu. Evaluation of automated teleretinal screening program for diabetic retinopathy. *JAMA ophthalmology*, 134(2):204–209, 2016.
- [48] Yuki Hagiwara, Joel En Wei Koh, Jen Hong Tan, Sulatha V Bhandary, Augustinus Laude, Edward J Ciaccio, Louis Tong, and U Rajendra Acharya. Computer-aided diagnosis of glaucoma using fundus images: a review. *Computer methods and programs in biomedicine*, 165:1–12, 2018.
- [49] Tessa A Hadlock and Luke S Urban. Toward a universal, automated facial measurement tool in facial reanimation. *Archives of facial plastic surgery*, 14(4):277–282, 2012.
- [50] Erienne V Olesh, Sergiy Yakovenko, and Valeriya Gritsenko. Automated assessment of upper extremity movement impairment due to stroke. *PloS one*, 9(8):e104487, 2014.
- [51] Vadim N Dedov and Irina V Dedova. Automated management of exercise intervention at the point of care: application of a web-based leg training system. *JMIR rehabilitation and assistive technologies*, 2(2):e4812, 2015.
- [52] Agnes WK Lam, Danniell Varona-Marin, Yeti Li, Mitchell Fergenbaum, and Dana Kulić. Automated rehabilitation system: movement measurement and feedback for patients and physiotherapists in the rehabilitation clinic. *Human–Computer Interaction*, 31(3-4):294–334, 2016.
- [53] Jose A Moral-Munoz, Wenjuan Zhang, Manuel J Cobo, Enrique Herrera-Viedma, and David B Kaber. Smartphone-based systems for physical rehabilitation applications: a systematic review. *Assistive Technology*, pages 1–14, 2019.
- [54] Ryan Nussbaum, Christopher Kelly, Eleanor Quinby, Ami Mac, Bambang Parmanto, and Brad E Dicianno. Systematic review of mobile health applications in rehabilitation. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 100(1):115–127, 2019.
- [55] Ralph Maddison, Robyn Whittaker, Ralph Stewart, Andrew Kerr, Yannan Jiang, Geoffrey Kira, Karen H Carter, and Leila Pfaeffli. Heart: heart exercise

and remote technologies: a randomized controlled trial study protocol. *BMC cardiovascular disorders*, 11(1):1–7, 2011.

- [56] Britt Klein, Denny Meyer, David William Austin, and Michael Kyrios. Anxiety online—a virtual clinic: preliminary outcomes following completion of five fully automated treatment programs for anxiety disorders and symptoms. *Journal of Medical Internet Research*, 13(4):e89, 2011.
- [57] Fatemeh Mohammadi Amiri and Ameneh Khadivar. Fuzzy ekspertni sustav za dijagnozu i liječenje mišićnoskeletnih poremećaja u ručnom zglobo. *Tehnički vjesnik*, 24(Supplement 1):147–155, 2017.
- [58] Adrian A Hopgood. *Intelligent systems for engineers and scientists*. CRC press, 2012.
- [59] Maede Maftouni, IB Turksen, MH Fazel Zarandi, and Faezeh Roshani. Type-2 fuzzy rule-based expert system for ankylosing spondylitis diagnosis. In *2015 Annual Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS) held jointly with 2015 5th World Conference on Soft Computing (WConSC)*, pages 1–5. IEEE, 2015.
- [60] Kemal Polat and Salih Güneş. An expert system approach based on principal component analysis and adaptive neuro-fuzzy inference system to diagnosis of diabetes disease. *Digital Signal Processing*, 17(4):702–710, 2007.
- [61] Ali Keleş, Aytürk Keleş, and Uğur Yavuz. Expert system based on neuro-fuzzy rules for diagnosis breast cancer. *Expert systems with applications*, 38(5):5719–5726, 2011.
- [62] S Muthukaruppan and Meng Joo Er. A hybrid particle swarm optimization based fuzzy expert system for the diagnosis of coronary artery disease. *Expert Systems with Applications*, 39(14):11657–11665, 2012.
- [63] Rahil Hosseini, Farzaneh Latifi, and Mahdi Mazinani. A fuzzy-ga approach for parameter optimization of a fuzzy expert system for diagnosis of acute lymphocytic leukemia in children. *Journal of Advances in Computer Engineering and Technology*, 2(2):33–42, 2016.

- [64] S Amrollahi Biyouki, IB Turksen, and MH Fazel Zarandi. Fuzzy rule-based expert system for diagnosis of thyroid disease. In *2015 IEEE Conference on Computational Intelligence in Bioinformatics and Computational Biology (CIBCB)*, pages 1–7. IEEE, 2015.
- [65] Ali Akbar Sadat Asl and Mohammad Hossein Fazel Zarandi. A type-2 fuzzy expert system for diagnosis of leukemia. In *North American Fuzzy Information Processing Society Annual Conference*, pages 52–60. Springer, 2017.
- [66] Margareta Nordin and Victor Hirsch Frankel. *Basic biomechanics of the musculoskeletal system*. Lippincott Williams & Wilkins, 2001.
- [67] Robert Bruce Salter, Fernando Álvarez Goenaga, Jordi Faig Martí, et al. *Trastornos y lesiones del sistema musculoesquelético: introducción a la ortopedia, fracturas y lesiones articulares, reumatología, osteopatía metabólica y rehabilitación*. 2000.
- [68] Kenneth S Saladin. *Anatomía y fisiología*. McGraw Hill, 2013.
- [69] blogspot. Todo sobre fisioterapia, 2012. Acceso en noviembre 15, 2024.
- [70] José Luis Moliné Marco and M^a Dolores Solé Gómez. Ntp 546: Primeros auxilios: fracturas, luxaciones y esguinces.
- [71] Giovanni Mazzocca Grespan, Gianni Mazzocca Spallotta, Antonio Rivas Molina, Juan Cosse Matute, Manuel Brito Velásquez, and Firas Souki Chmeit. Tratamiento quirúrgico de las fracturas de tobillo tipo b. serie de casos. *Revista del Pie y Tobillo*, 30(2):82–86, 2016.
- [72] Christian Michel Ávila Méndez. Factores de riesgo para presentar dolor crónico de tobillo en pacientes con fractura de tobillo clasificados con davis weber y ao en el centenario hospital miguel hidalgo. 2021.
- [73] M Morris Mano. *Lógica digital y diseño de computadores*. Pearson Educación, 1982.
- [74] T Hesterberg, DS Moore, S Monaghan, A Clipson, R Epstein, DS Moore, and GP McCabe. Bootstrap methods and permutation tests,(2005).

- [75] Francisco Javier Ariza López, José Rodríguez Avi, and María Virtudes Alba Fernández. Control estricto de matrices de confusión por medio de distribuciones multinomiales. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (21):6, 2018.
- [76] David MW Powers. Evaluation: from precision, recall and f-measure to roc, informedness, markedness and correlation. *arXiv preprint arXiv:2010.16061*, 2020.