

INSTITUT GUTTMANN

MÀSTER EN NEUROREHABILITACIÓ 25/26

INDIVIDUALITZACIÓ DE TRACTAMENT A TRAVÉS D'UNA VALORACIÓ BASADA EN LA BIOIMPEDÀNCIA I L'ERGOESPIROMETRIA EN PERSONES AMB PARÀLISI CEREBRAL

TREBALL FINAL DE MÀSTER

MARK CASTRO GARCÍA

TUTORES:

MARTA GONZÁLEZ ÁLAMOS

SELMA DELGADO GALLÉN

NDEX

2. RESUM.....	3
3. ANTECEDENTS	4
3.1 Fisiopatologia de la paràlisi cerebral.....	4
3.2 L'ergoespirometria a la paràlisi cerebral	5
3.3 Selecció del mode i protocol de càrrega	5
3.4 La bioimpedància en la paràlisi cerebral	7
3.5 Limitacions de la literatura existent.....	9
4. OBJECTIUS.....	10
4.1 Objectiu general	10
4.2 Objectius específics.....	10
5. NIVELL D'EVIDÈNCIA DE LA PROPOSTA	11
5.1 Evidència de la intervenció	11
5.2 Evidència dels instruments de valoració	12
6. METODOLOGIA	13
6.1 Criteris d'inclusió	13
6.2 Disseny del protocol	14
6.3 Protocol d'intervenció	21
6.3.3 Reavaluació post-intervenció i entrevista final	23
6.4 Aplicació pràctica	25
7. RESULTATS ESPERATS I CRITERIS DE RESPOSTA O EFICÀCIA	30
7.1 Adaptacions fisiològiques	30
7.2 Adaptacions estructurals i tissulars.....	30
7.3 Adaptacions clíniques i psicosocials.....	31
7.4 Criteris de resposta i marcadors d'eficàcia	31
8. VALORACIÓ CRÍTICA I CONCLUSIONS DEL PROCÉS D'APRENTATGE ...	31
8.1 Conclusions de la proposta i futures línies de recerca	32
8.2 Conclusions del procés d'aprenentatge i reflexió professional	33
9. REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES	34
10. ANNEXOS.....	39

2. RESUM

La paràlisi cerebral, PC, constitueix una patologia que genera profundes alteracions metabòliques, estructurals i funcionals. Malgrat el consens científic i l'alt nivell d'evidència sobre els beneficis de l'exercici físic, la pràctica en neurorehabilitació sovint pateix una manca de protocols d'entrenament i objectius que rebutgin les fórmules teòriques predictives.

Aquest disseny de programa clínic té com a objectiu principal establir un protocol d'exercici físic individualitzat per a persones amb PC, classificades en els nivells del sistema de classificació de la funció motora grossa, GMFCS I-III, orientat a la millora de la capacitat funcional, l'autonomia i l'autogestió de la salut.

El protocol s'estructura en un flux de treball que integra instrumentació diagnòstica considerada *gold standard*. S'utilitza l'anàlisi de bioimpedància, BIA, per quantificar la integritat cel·lular i les asimetries severes de la massa muscular esquelètica, conjuntament amb la CPET mitjançant un protocol en rampa per detectar els límits ventilatoris.

La intervenció principal, dissenyada per a una durada de deu setmanes, pauta un entrenament de força, exercicis d'estabilitat i de resistència aeròbica on la intensitat ve delimitada pels límits reals de la persona.

L'aplicabilitat clínica de la proposta es valida mitjançant l'exposició d'un cas pilot, demostrant la viabilitat de traduir dades de laboratori en zones d'entrenament segures. Es preveu que l'aplicació d'aquest programa permeti optimitzar el consum màxim d'oxigen, augmentar l'angle de fase, PhA, i atenuar l'envelliment prematur del teixit.

Com a conclusió, la individualització del protocol no només millora la part física de la persona, sinó també l'apartat biopsicosocial, essencial per garantir excel·lents taxes d'adherència terapèutica, millorant l'autoestima i la qualitat de vida de la persona amb discapacitat neurològica.

3. ANTECEDENTS

La PC constitueix la causa més freqüent de discapacitat en la infància i persisteix com una condició de salut crònica al llarg de la vida.

Aquesta no és una condició estàtica exclusivament neurològica, sinó una patologia dinàmica amb profundes repercussions metabòliques, estructurals i funcionals en el teixit musculoesquelètic.

El moviment humà depèn de la transformació eficient d'energia química en energia mecànica. En la població amb PC, aquesta eficiència està compromesa a causa de l'alteració del control motor, la miopatia secundària i la disfunció metabòlica.

3.1 Fisiopatologia de la paràlisi cerebral

L'alteració de les vies corticoespinals provoca un fenomen de coactivació muscular excessiva, on els músculs agonistes i antagonistes es contrauen simultàniament, a diferència d'una persona convencional on la relaxació de l'antagonista és passiva. Això provoca un elevat cost energètic de la locomoció, fins a dues o tres vegades per sobre (Unnithan et al., 1996).

A més, el teixit muscular parètic presenta alteracions estructurals severes, com una predominança de fibres tipus II, atrofia de les fibres tipus I i una progressiva infiltració de teixit adipós i fibròtic. Aquesta remodelació disminueix dràsticament la densitat mitocondrial i la capil·larització, limitant la capacitat oxidativa sistèmica.

L'evidència actual redefineix el múscul en la PC com un teixit patològicament alterat, conegut com a miopatia de la PC. Lieber i Fridén demostren que l'espasticitat no és només un fenomen neural, sinó que s'acompanya de canvis intrínsecs (Lieber & Fridén, 2019):

- Alteració sarcomèrica: els sarcòmers presenten longituds extremadament llargues, això situa el múscul en la porció descendent de la corba tensió-longitud, generant una debilitat intrínseca mecànica que no pot ser corregida exclusivament amb entrenament de força convencional.
- Fibrosi i qualitat tissular: existeix una substitució progressiva del teixit contràctil per matriu extracel·lular i col·lagen, aquesta fibrosi augmenta exponencialment la rigidesa passiva del múscul, obligant la persona a realitzar un major treball mecànic per vèncer la resistència interna dels seus propis teixits durant el moviment (Smith et al., 2011).
- Dèficit de cèl·lules satèl·lit: hi ha una reducció del 50-70%, aquestes cèl·lules són essencials per a la regeneració tissular i la hipertròfia. La seva escassetat implica que el múscul té una capacitat limitada per reparar-se post-esforç i per créixer longitudinalment al mateix ritme que l'os, contribuint a la gènesi de les contractures fixes (Smith et al., 2013).

A nivell cel·lular, això implica una demanda constant i elevada d'ATP, fins i tot a intensitats de càrrega aparentment baixes. Si considerem el que va esmentar López Chicharro, que les reserves de fosfocreatina són limitades, la dependència del metabolisme aeròbic és molt alta. Tanmateix, la baixa densitat mitocondrial i la pobra capil·larització associades a la miopatia de la PC comprometen la capacitat oxidativa, conduint a una fatiga precoç i a l'aparició prematura del llindar anaeròbic (López Chicharro, 2006; Verschuren et al., 2016).

3.2 L'ergoespiometria a la paràlisi cerebral

L'ergoespiometria, CPET, és reconeguda com el *gold standard* per avaluar la resposta integrada dels sistemes respiratori, cardiovascular i musculoesquelètic davant l'estrès de l'exercici, però la seva aplicació en PC presenta reptes específics que invaliden molts dels protocols clínics estàndard.

En l'àmbit de la neurorehabilitació, les proves submàximes, com els *6 minuts walking test*, s'han utilitzat sovint; no obstant això, Slaman et al., i Verschuren & Takken, indiquen que hi ha una baixa correlació per predir de manera fiable el consum màxim d'oxigen en adolescents i adults deambulants amb PC que no permeten detectar els llindars ventilatoris necessaris per a la prescripció precisa de l'exercici (Slaman et al., 2013; Verschuren & Takken, 2010).

Aquest tipus de població presenten valors de VO₂peak significativament inferiors al d'una persona sense cap classe de patologia neurològica, per culpa de la ineficiència mecànica i al cost metabòlic més elevat de la marxa (Graham et al., 2016).

Recentment, Wijnhoud et al., han establert els valors de referència per aquesta població situats al voltant de 32,8 mL/kg/min, a diferència dels 45 mL/kg/min que tenen les persones sense cap neuropatia. Això representa una reducció de gairebé un 30% en la seva capacitat aeròbica base (Wijnhoud et al., 2024).

Aquest valor manté una relació inversament proporcional amb la funcionalitat. El consum d'oxigen és més baix a mesura que l'afectació és major, és a dir de GMFCS I a GMFCS IV. Aquest dèficit és major per culpa de l'envelliment prematur, tenint reduccions fins al 40-45% respecte a la població convencional (Slaman et al., 2013).

Tot això fa que la CPET, sigui indispensable. Mitjançant l'anàlisi de l'intercanvi de gasos i el seguiment gràfic, permet determinar els llindars fisiològics de forma no invasiva.

3.3 Selecció del mode i protocol de càrrega

S'ha de tenir en compte el nivell de GMFCS de la persona, ja que si la CPET es realitza en una màquina de córrer amb un subjecte GMFCS III, incrementa els patrons de marxa patològics, augmentant el risc de caiguda, impedit una avaluació cardiorespiratòria neta.

És per això que l'elecció del cicloergòmetre és una decisió important, pel fet que cada PC és diferent, depenent del grau d'afectació es necessitarà la utilització d'un o d'un altre.

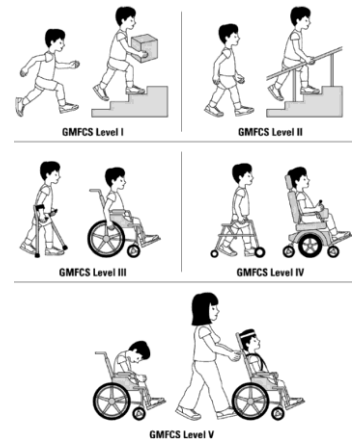
3.3.1 Classificació funcional

La distribució per tipus motor és heterogènia. La forma espàstica és la variant predominant, representant entre el 70% i el 80% de tots els casos, seguida per les formes discinètiques i atàxiques, que representen percentatges menors (Novak et al., 2017).

La classificació més utilitzada és sistema de classificació de la funció motora grossa, GMFCS:

És l'estàndard mundial per descriure la mobilitat. Classifica el nen segons el seu patró de marxa (Palisano et al., 1997).

- Nivell I: camina sense restriccions.
- Nivell II: camina sense ajudes però amb limitacions en exteriors.
- Nivell III: camina amb dispositius d'ajuda.
- Nivell IV: mobilitat autònoma limitada; utilitza cadira de rodes motoritzada o transport manual.
- Nivell V: transportat en cadira de rodes manual; limitació severa del control antigravitatori del cap i el tronc.



Les dades poblacionals indiquen que aproximadament el 55-60% dels individus amb PC són deambulants, és a dir GMFCS I, II, III mentre que el 40% restant presenta una afectació severa que requereix l'ús de cadira de rodes (Reid et al., 2011).

Il·lustració 1 Nivell del GMFCS (Palisano et al., 1997).

3.3.2 Elecció del cicloergòmetre

Tot i que amb la cinta de córrer se solen arribar a valors de VO₂peak lleugerament superiors. El cicloergòmetre és la màquina preferent per a subjectes GMFCS I-III, a causa de la seva seguretat, estabilitat i un menor requisit de coordinació motora, minimitzant així, el risc de caigudes (Verschuren et al., 2011).

3.3.3 Elecció del protocol de càrrega

Els protocols esglaonats tradicionals sovint fracassen perquè els augments bruscos de càrrega provoquen una fatiga muscular prematura abans d'assolir el límit cardiovascular, és a dir, trenquen l'equilibri metabòlic, provocant ajustos no lineals en el consum d'oxigen. Això en un subjecte amb una economia de marxa ja compromesa induïx una fatiga muscular abans que el sistema cardiovascular arribi al seu límit real (Myers et al., 1991).

En canvi, segons Wasserman, els protocols en rampa, amb increments lineals i continus, són més adaptables a aquesta població, perquè mantenen una resposta lineal del VO₂ respecte al temps, faciliten la detecció del primer llindar ventilatori, VT1 i evita l'estrès mecànic sobtat, millorant la tolerància i permetent assolir un esforç màxim real limitat pel sistema cardiorespiratori i no per claudicació muscular perifèrica (Wasserman, 2005).

L'elecció del protocol no només ha de respondre a la capacitat mecànica del subjecte, sinó que ha de considerar les alteracions en el control autonòmic cardiovascular de la PC.

A diferència de la població convencional, on la freqüència cardíaca, FC, augmenta de manera predictable fins a la FC màx teòrica, les persones amb PC sovint presenten incompetència cronotròpica. Aquest concepte defineix la incapacitat del node sinusal per augmentar la freqüència de batec de manera proporcional a l'increment de la demanda metabòlica durant

l'exercici . Com a resultat, l'acceleració de la FC pot ser erràtica o estancar-se prematurament abans d'assolir els valors màxims teòrics necessaris per mantenir la despesa cardíac òptim (Gąsior et al., 2020).

D'altra banda, la dinàmica de la recuperació de la FC post exercici també es troba alterada. En una persona convencional, la caiguda abrupta de la FC durant el primer o segon minut després de finalitzar l'esforç és impulsada per una ràpida reactivació parasimpàtica. En individus amb PC, aquesta reactivació és deficient o s'endarrereix, prolongant excessivament el temps de recuperació cardiovascular i evidenciant una deficiència greu en la desaceleració vagal (Gąsior et al., 2020).

Aquestes alteracions fisiològiques fan que les equacions predictives tradicionals utilitzades per estimar la FC màxima, com la clàssica fórmula $220 - \text{edat}$, quedin invalidades (Gąsior et al., 2020).

L'ús metodològic d'aquestes fórmules tendeix a sobreestimar el líndar màxim real de la persona, exposant-la a errors greus i a un risc d'esgotament en la prescripció de la intensitat d'entrenament (Balemans et al., 2013; Verschuren & Takken, 2010).

Per consegüent, per garantir una prescripció segura i eficaç de les zones d'entrenament, es rebutja les estimacions teòriques i s'obté la FC d'entrenament a través d'una CPET màxima o submàxima, vinculant-la directament a fites metabòliques reals com el VT1.

Un cop obtingudes aquestes dades, Unnithan et al., emfatitzen la necessitat de normalitzar el VO₂peak no només pel pes total, sinó per la massa lliure de greix o per la massa cel·lular activa, donada la composició corporal alterada en la PC (Unnithan et al., 1996).

3.3.4 Criteris de màxim esforç

No només la normalització de les dades s'ha d'adaptar a la discapacitat, sinó que també ho han de fer els criteris per poder considerar la prova com a màxima. Segons Balemans es considera una prova vàlida si es compleixen almenys dos de tres criteris (Balemans et al., 2013):

1. Quocient respiratori 1.05 - 1.10: indicador que el metabolisme és predominantment anaeròbic.
2. Freqüència cardíaca: supera el 95% de la FC màxima teòrica, que sovint no s'arribarà a complir per la incompetència cronotròpica comentada anteriorment.
3. Esgotament subjectiu: una puntuació de ≥ 17 en l'escala de Borg o l'incapacitat de mantenir la cadència de pedaleig, per sota de 60 rpm.

3.4 La bioimpedància en la paràlisi cerebral

Si la CPET ens informa sobre la funció, la BIA, ens ha d'informar sobre l'estructura que sustenta aquesta funció. És impossible interpretar correctament un valor de VO₂ absolut en un subjecte amb PC sense conèixer la seva massa cel·lular activa real, ja que el múscul és responsable de més del 90% del consum d'oxigen durant l'esforç (McArdle, 2015).

L'avaluació de la composició corporal en PC mitjançant mètodes tradicionals, com IMC i plecs cutanis, presenta greus biaixos, ja que no es distingeix entre massa grassa i lliure de greix i l'atròfia muscular, que poden emascarar-se sota un pes normal.

Les equacions estàndard de BIA assumeixen una hidratació constant de la massa lliure de greix.

Stallings et al. i Gurka et al., indiquen que aquesta premissa, en població amb PC, sovint no es compleix perquè presenten una hidratació alterada de la massa magre, i una baixa densitat òssia. Això fa que l'aplicació d'equacions estàndard condueixi a errors de mesura; sobreestimació de la massa muscular i subestimació del teixit adipós, ja que l'excés d'aigua s'interpreta erròniament per la fórmula com a múscul (Gurka et al., 2010; Stallings et al., 1995).

Per superar aquestes limitacions, la literatura proposa l'ús de dades vectorials brutes, impedància, resistència i reactància, sense passar per fórmules estimatives.

3.4.1 Angle de fase i gràfics RXc

Aquest paràmetre actua com un biomarcador global de la salut cel·lular. Segons Pingel et al., en persones amb PC s'ha demostrat que el PhA, es correlaciona inversament amb el nivell de GMFCS i positivament amb la força muscular. És a dir valors baixos de PhA reflecteixen una baixa qualitat muscular, una disminució de la integritat de la membrana cel·lular i una pitjor funció motora (Pingel et al., 2020).

La projecció del vector d'impedància en el gràfic RXc permet classificar la persona segons el seu estat d'hidratació i massa cel·lular, visualitzant els canvis sense dependre d'equacions que podrien sobreestimar la massa muscular (Piccoli et al., 1994).

En l'anàlisi vectorial clàssic, una pèrdua de qualitat muscular es tradueix en un desplaçament del vector cap al quadrant inferior dret. Aquest patró concorda amb la PC, ja que autors com Pingel et al., han demostrat mitjançant la BIA que aquestes persones presenten una pitjor qualitat muscular i un PhA marcadament reduït (Pingel et al., 2020).

3.4.2 Elecció de la bioimpedància

Actualment, el mercat disposa de múltiples equips de BIA, on predominen les de bipedestació (Kyle, 2004).

El problema de l'ús de les plataformes de bipedestació en la població amb PC són les alteracions posturals i morfològiques de la mateixa patologia (Więch et al., 2020).

Per posar un exemple, una de les deformacions més prevalents és el peu equí, escurçament del tríceps sural. Aquesta alteració impedeix un contacte plantar complet i homogeni sobre l'elèctrode metàl·lic de la bàscula, reduint l'àrea d'interfície pell-elèctrode. Si l'àrea de contacte al taló o la planta del peu és insuficient la resistència elèctrica augmenta de manera artificial i desproporcionada (Marquez et al., 2011).

A més, la inestabilitat postural i les contraccions isomètriques compensatòries que la persona ha de fer per mantenir-se dret alteren la distribució dels fluids corporals durant la prova.

Per tant, per garantir la màxima fiabilitat, s'han d'utilitzar dispositius de BIA dissenyats per al decúbit supí. Aquests models requereixen l'ús de tecnologia d'elèctrodes tàctils tetrapolars, ja siguin pinces als dits de la mà i turmells, o elèctrodes adhesius. Aquesta metodologia garanteix que l'àrea de contacte elèctric es mantingui estable, evitant qualsevol distorsió i permetent una lectura de la composició del teixit intramuscular i la integritat de la membrana (Kyle, 2004).

3.5 Limitacions de la literatura existent

Malgrat l'evidència científica, existeix una manca de protocols clínics estandarditzats i aplicables a la pràctica diària que integrin simultàniament ambdues tecnologies per a la prescripció de l'exercici. La majoria dels programes de neurorehabilitació esportiva continuen guiant-se per escales de percepció subjectiva o fórmules cardíaques inadequades per a aquesta població. Per consegüent, es fa indispensable el disseny d'un protocol rigorós que incorpori aquestes tecnologies, això permet establir amb precisió i seguretat les zones d'entrenament i optimitzar la metodologia de treball per a les persones amb PC.

4. OBJECTIUS

4.1 Objectiu general

- Millorar la capacitat funcional i l'autonomia motora de persones amb PC nivells GMFCS I-II-III mitjançant un programa d'entrenament individualitzat a partir de dades objectives de BIA i CPET, promovent alhora l'adherència a llarg termini a l'activitat física com a eina d'autogestió de la seva salut.

4.2 Objectius específics

- Optimitzar la capacitat aeròbica i la qualitat muscular: incrementant la tolerància a l'esforç i retardar l'aparició de la fatiga perifèrica mitjançant càrregues de treball pautades exactament segons els límits ventilatoris.
- Potenciar la funcionalitat en les activitats de la vida diària: traduint els guanys de força, estabilitat i resistència obtinguts durant l'entrenament en una millora en la realització d'accions i responsabilitats quotidianes.
- Fomentar l'autogestió de l'entrenament: dotant als usuaris dels coneixements teòrics i pràctics bàsics sobre els principis de l'exercici perquè siguin capaços de dissenyar i mantenir rutines segures un cop finalitzat el programa clínic.
- Facilitar la transferència a entorns comunitaris: proporcionant estratègies per adaptar els exercicis apresos a recursos de l'entorn proper de l'usuari, sigui gimnasos o el propi domicili.
- Consolidar l'hàbit esportiu: generant una adherència a l'activitat física mitjançant una experiència d'entrenament còmode, agradable i motivadora per a la persona.
- Integrar la psicoeducació sobre els beneficis de l'exercici: assegurant-se que els subjectes comprenguin i experimentin els beneficis biopsicosocials de l'activitat física, no només per la millora funcional, sinó com a eina per a la gestió de l'estrès, la millora de l'autoestima i el benestar psicològic global.

5. NIVELL D'EVIDÈNCIA DE LA PROPOSTA

5.1 Evidència de la intervenció

El disseny del present protocol d'intervenció es fonamenta en la integració de pràctiques clíniques amb suport científic actual en l'àmbit de la neurorehabilitació, sotmeses a una avaluació crítica segons els estàndards metodològics internacionals.

Segons la revisió sistemàtica i el metaanàlisi de referència "*State of the Evidence Traffic Lights 2019*" elaborada per Novak et al., l'entrenament de la capacitat cardiorespiratòria i l'entrenament de força muscular s'ubiquen a la zona de màxima recomanació clínica. Aquestes intervencions han demostrat de manera concloent la seva eficàcia per millorar la funció motora grossa, augmentar la velocitat de la marxa i millorar la salut general en persones amb PC. Així mateix, l'apoderament de la persona i els programes orientats a tasques funcionals també compten amb el màxim nivell de recomanació per millorar la participació i assegurar l'adherència a llarg termini a l'exercici (Novak et al., 2020).

Desglossant aquesta evidència en els dos components del protocol d'entrenament trobem que per l'entrenament aeròbic, revisions sistemàtiques específiques com les de Verschuren et al. i estudis fisiològics com els de Balemans et al., demostren la seguretat i viabilitat de portar persones amb PC a esforços màxims (Balemans et al., 2013; Verschuren & Takken, 2010).

A més, revisions recents com les de Wijnhoud et al. i Slaman et al., confirmen que l'entrenament de resistència pautat objectivament aconsegueix increments significatius del consum màxim d'oxigen mitigant el deteriorament funcional associat a l'envelliment d'aquestes persones (Slaman et al., 2013; Wijnhoud et al., 2024).

Més enllà de les revisions sistemàtiques internacionals, l'èxit d'aquestes intervencions depèn de la seva correcta estructuració en l'entorn hospitalari i de rehabilitació. Estudis clínics recents, duts a terme en centres de referència en neurorehabilitació com el de González-Álamos et al., demostren que la implementació de programes d'exercici físic individualitzats, fonamentats en una valoració amb CPET prèvia, permet executar intervencions segures i progressives en patologia neurològica. L'ús d'aquesta metodologia, sumat al monitoratge de FC en temps real per controlar la tolerància a la càrrega, ha demostrat assolir taxes d'adherència al tractament excel·lents, xifrades en un 95%. Aquesta evidència confirma que la individualització fisiològica rigorosa és el factor determinant per consolidar l'hàbit de l'exercici físic en aquesta població (González-Álamos et al., 2025).

I per a l'entrenament de la força, l'evidència ha desmentit que l'esforç d'alta intensitat intensifica l'espasticitat. Autors de referència com Dodd et al. i Damiano & Abel han evidenciat que els programes d'enfortiment progressiu augmenten la producció de força útil, milloren la cinemàtica de la marxa i no produeixen efectes adversos sobre el to muscular (Dodd et al. 2002; Damiano & Abel 1998).

5.2 Evidència dels instruments de valoració

La CPET és reconeguda universalment com el *gold standard* per a la valoració integrada del metabolisme i el sistema cardiorespiratori (Wasserman, 2005).

En l'àmbit específic de PC, el consens internacional *Delphi* sobre proves d'exercici liderat per Verschuren et al. estableix la CPET com l'eina òptima i necessària per avaluar la capacitat aeròbica real i establir els llindars ventilatoris, superant les limitacions de proves submàximes com els *6 minuts walking test*, *6MWT* (Verschuren et al., 2011).

L'ús de la BIA, segueix les directrius del consens europeu per a l'ús de la BIA en decúbit supí establertes per Kyle et al. En les persones amb patologia neurològica estudis com els de Pingel et al. donen un alt nivell d'evidència a la BIA com a mètode no invasiu per a l'avaluació de la salut muscular i del PhA en adults amb PC (Kyle, 2004) (Pingel et al., 2020).

A més, l'aplicació del model gràfic RXc ideat per Piccoli et al. aporta una fiabilitat per mesurar la integritat cel·lular independentment de les deformitats estructurals de la persona, evitant els biaixos de les fórmules predictives basades en antropometria convencional (Piccoli et al., 1994).

6. METODOLOGIA

6.1 Criteris d'inclusió

Per al disseny d'aquest protocol d'intervenció, s'ha seleccionat la subpoblació classificada en els nivells I-II-III del GMFCS els quals representen persones deambulants independents.

La justificació d'aquesta selecció es basa en diferències fisiològiques, metodològiques i poblacionals.:

Per tal que la CPET sigui vàlida i permeti identificar l'aparició del llindar anaeròbic i el punt de compensació respiratòria, el subjecte ha de poder sostenir un esforç continuat fins a esgotar la via aeròbica. En persones amb GMFCS IV-V, la prova s'atura prematurament a causa d'una claudicació perifèrica abans d'assolir el límit cardiorespiratori central. Els subjectes GMFCS I i II, en canvi, posseeixen un control motor suficient per poder executar, cosa que permet una lectura real de la seva capacitat funcional sistèmica.

Com s'ha comentat anteriorment, el protocol utilitzat serà en rampa, lineal i continu, ja que és més adaptable, permet detectar el VT1, evita l'estrès mecànic sobtat i permet assolir un esforç màxim real limitat pel sistema cardiorespiratori i no per claudicació muscular perifèrica.

L'elecció del cicloergòmetre es basa en quin és més segur, quin dona més estabilitat i menor requisit de coordinació motora per reduir el risc de caigudes per a aquest grup de persones. En aquests casos el més adient depèn de l'afectació de la persona, es podrà realitzar tant en cicloergòmetre de braços com de cames.

Per evitar distorsions en la BIA, el protocol de mesura exigeix un decúbit supí, amb els braços abduïts 15 graus i els membres inferiors separats sense contacte mutu. Mentre que les persones GMFCS IV-V solen presentar deformitats òssies severes, flexos estructurats i contractures fixes que dificulten la realització d'aquesta postura estàndard, les persones GMFCS I-II-III poden complir els estàndards de posicionament, garantint l'obtenció d'un PhA i una anàlisi vectorial altament fiables.

A més les dades poblacionals indiquen que aproximadament el 55-60% dels individus amb PC són GMFCS I, II, III mentre que el 40% restant presenta una afectació severa.

Taula 1. Criteris d'inclusió i exclusió

CRITERIS D'INCLUSIÓ I EXCLUSIÓ	
INCLUSIÓ	EXCLUSIÓ
Diagnòstic clínic confirmat de PC de qualsevol tipologia motora.	Presència de contraindicacions per a la realització de la CPET segons l'american college of sports medicine, ACSM com les arrítmies cardíagues inestables no controlades
Classificació en els nivells I, II o III del GMFCS	
Capacitat cognitiva i de comprensió suficient per seguir ordres simples, mantenir l'atenció durant les tasques d'entrenament i expressar de forma fiable el nivell de fatiga percebuda.	Deformitats òssies o flexos estructurats fixos que impedeixin l'acoblament als cicloergòmetres o impossibilitin la separació de membres en decúbit supí.

6.2 Disseny del protocol

Per garantir la reproductibilitat i la seguretat de la intervenció, tots els subjectes inclosos en el programa se sotmetran a un flux de treball estandarditzat dividit en quatre fases d'avaluació abans d'iniciar la prescripció de l'exercici.

- Fase 1: anamnesi i avaluació prèvia.
- Fase 2: valoració estructural mitjançant l'ús de la BIA.
- Fase 3: valoració funcional mitjançant la CPET.
- Fase 4: reavaluació postintervenció i entrevista final.

6.2.1 Anamnesi

L'avaluació es comença amb una recollida de dades clíniques, funcionals i esportives. Aquesta fase no només té una funció informativa, sinó que actua com un protocol de seguretat segons les guies de l'ACSM per identificar contraindicacions, cardiorespiratòries o autonòmiques, abans d'un esforç màxim.

L'anamnesi en una patologia neurològica no és només una base de dades, és un filtre de seguretat i guia de calibratge per a la utilització de les diferents màquines del protocol.

El protocol d'anamnesi s'estructura en els següents dominis:

1. Dades demogràfiques i perfil base:
 - Recull de dades personals, nom, edat, sexe entre d'altres.
2. Historial neurològic i funcional:
 - Etiologia i topografia: identificació del tipus de PC; hemiparèsia, diplegia, tetraplegia, etc.
 - Classificació GMFCS: determinació del nivell de funcionalitat motora; nivells I-II-II per a aquest protocol.
 - Estat neuromuscular: quantificació de l'espasticitat mitjançant l'escala d'Asworth modificada i valoració del control motor selectiu.
3. Antecedents medico-quirúrgics i farmacològics:
 - Cirurgies: historial d'intervencions quirúrgiques.
 - Tractaments específics de l'espasticitat: documentació tant d'infiltracions amb toxina botulínica o ús de baclofèn, com d'utilització d'ortesis.
4. Antecedents familiars i risc cardiovascular:
 - Investigació de malalties hereditàries o casos de mort sobtada en familiars de primer o segon grau, essencial per estratificar el risc durant la CPET.
5. Perfil esportiu i estil de vida:
 - Detall de l'activitat física actual, hores setmanals, intensitat i anys de pràctica.

6. Factors metabòlics i hàbits:

- Dieta i suplementació: avaluació de l'estat nutricional.
- Hàbits tòxics: consum de tabac o alcohol que pugui interferir en la resposta vascular.
- Salut hormonal: en dones, registre del cicle menstrual i ús d'anticonceptius, a causa de la seva influència en la retenció de líquids i els valors de BIA.

7. Simptomatologia actual:

- Presència de dolor musculoesquelètic crònic o fatiga percebuda: factors que poden limitar la CPET per claudicació subjectiva abans de l'esgotament fisiològic.

6.2.2 Valoració estructural mitjançant l'ús de la BIA

En aquesta segona fase el que volem és quantificar la composició corporal i la integritat cel·lular de la persona superant les limitacions de l'antropometria clàssica en poblacions amb PC.

Per a l'execució d'aquest protocol, es disposarà d'una combinació de tecnologies d'anàlisi d'impedància bioelèctrica multifreqüència com el BWA 2.0 i l'InBody S10 per a valoracions persones amb una afectació més severa de la PC, i l'InBody 770 per a valoracions en bipedestació en casos de control postural òptim.

6.2.2.1 Protocol de preparació

Per garantir la reproductibilitat de les dades i evitar biaixos de mesura, el protocol exigeix dos requisits:

- El subjecte haurà d'estar en dejú d'almenys quatre hores i en repòs durant 5-10 minuts abans de la mesura, ja que el consum d'aliments i begudes altera la concentració d'electròlits i el volum de sang circulant cap a l'aparell digestiu. Com la BIA mesura la facilitat amb què el corrent elèctric travessa l'aigua corporal, qualsevol procés digestiu actiu altera la conductivitat elèctrica del tronc, generant un error en el càlcul de la massa magra i el greix visceral (Kyle, 2004; InBody Co., Ltd., 2020).
- En posició vertical, la gravetat provoca una acumulació de fluids a les extremitats inferiors. En persones amb PC aquesta distribució pot ser encara més erràtica a causa d'un retorn venós menys eficient. El repòs en posició supina durant 10-15 minuts abans de la prova permet que els fluids es redistribueixin de manera homogènia per tot el cos, assegurant que la impedància mesurada correspongui a la hidratació cel·lular real i no a l'efecte de la gravetat (Kyle, 2004; InBody Co., Ltd., 2020).
- S'utilitzaran diferents freqüències de corrent, a través d'elèctrodes tàctils a la mà i als turmells o planta dels peus.

6.2.2.2 Posicionament segons dispositiu

El protocol s'adapta a la capacitat funcional del subjecte, prioritzant sempre la configuració que garanteixi el millor contacte elèctric:

- Configuració supina BWA 2.0 / S10

La persona se situa en decúbit supí, amb braços abduïts 15° i cames separades. S'utilitzen elèctrodes tàctils de pinça o adhesius col·locats en punts anatòmics precisos, polze/dit mitjà i mal·lèols, com es pot veure a la il·lustració 2. Aquesta configuració elimina el risc d'error per peu equí i permet una estabilitat absoluta dels fluids.



Il·lustració 2. Exemple de posició i muntatge per a la configuració del dispositiu BWA 2.0.

- Configuració de bipedestació InBody 770

Reservada per a persones amb suport plantar simètric i sense inestabilitat postural. En aquest cas, el subjecte es col·loca dret sobre els elèctrodes de base, agafant els elèctrodes de mà amb els polzes. Tot i que en aquesta posició no s'aplica el repòs supí previ per a la mesura, la persona ha d'estar en bipedestació relaxada almenys 5 minuts abans per minimitzar el canvi brusc de fluids.

6.2.2.3 Variables d'interès i anàlisi de dades

A partir de l'informe generat pel dispositiu, el protocol extraurà i analitzarà les següents variables per a la prescripció de l'exercici:

- Angle de fase:

S'utilitzarà com el biomarcador principal de la salut cel·lular i la integritat de la membrana muscular. Un PhA elevat es correlaciona amb una alta densitat mitocondrial i una millor qualitat del teixit. Per contra, valors inferiors als rangs de referència poblacional s'interpretaran com un indicador de baixa qualitat muscular i menor capacitat oxidativa, fet que obligarà a una progressió més conservadora.

- Anàlisi de l'aigua corporal (*body water*)
 - Aigua corporal total (TBW), aigua intracel·lular (ICW), aigua extracel·lular (ECW), permetran avaluar l'estat d'hidratació real i la massa cel·lular activa.
 - Ràtio d'edema, aquest índex s'utilitzarà per identificar estats inflamatoris sistèmics o musculars.

- Massa muscular esquelètica, SMM:

La massa muscular activa servirà per normalitzar posteriorment el V02 peak obtingut a la CPET.

- Índex de massa musculoesquelètica, SMI:

Calculat a partir de la massa magra de les extremitats permetrà monitorar la hipertròfia muscular real i l'efectivitat del protocol de força, independentment dels canvis en el teixit adipós.

- Anàlisi vectorial i impedància segmentària

Es registraran els valors bruts d'impedància, resistència i reactància a diferents freqüències per a cada segment corporal, això ens permetrà:

 - Identificar asimetries, ens permetrà quantificar les diferències de volum i funcionalitat cel·lular entre el costat afectat i el no afectat.
 - Amb els gràfics RxC ens permetrà tenir un seguiment longitudinal de la migració del vector. Aquest seguiment és el mètode més fiable per observar els canvis en l'estat d'hidratació i la massa cel·lular al llarg de la intervenció, sent una mesura independent de les fluctuacions del pes corporal.

6.2.3 Valoració funcional mitjançant l'ergoespirometria

La CPET amb anàlisi de gasos és el *gold standard* per determinar la capacitat funcional real i els límits metabòlics. A diferència de les proves de camp, la CPET permet observar la interacció entre els sistemes cardiovascular, respiratori i metabòlic en temps real.

6.2.3.1 Equipament i selecció de l'ergòmetre

El protocol s'executarà utilitzant un analitzador de gasos d'última generació degudament calibrat abans de cada prova. Per tal d'adaptar-se a les necessitats biomecàniques de la persona amb PC, es disposarà de dues modalitats:

1. Cicloergòmetre de cames

Indicat per a subjecte amb bona estabilitat de tronc i, sobretot, bona coordinació i força de membres inferiors.

Es prioritzarà l'ús de fixacions per evitar la claudicació per lliscament del peu afectat.

2. Cicloèrgometre de braços

S'utilitzarà com a alternativa o complement en persones on l'espasticitat de membres inferiors o les deformitats estructurals, limitin el pedaleig. Permet avaluar la capacitat aeròbica fent servir la musculatura del tren superior.

6.2.3.2 Protocol en rampa

Es farà servir un protocol en rampa individualitzat. Es començarà amb una fase de repòs, d'uns tres minuts, i d'escalfament sense càrrega, de la mateixa duració. La resistència augmentarà de forma lineal i continua per exemple, entre 5-15 watts/min depenen de la discapacitat, per tal d'assolir l'esgotament en un període de temps d'entre vuit i dotze minuts.

6.2.3.3 Monitoratge de la freqüència cardíaca i l'esforç

Aquesta variable no només s'utilitzarà per a l'avaluació durant la CPET, sinó que ens servirà com a eina per pautar i controlar la càrrega interna durant les sessions del programa d'exercici físic.

Per garantir la fiabilitat de les dades, es farà ús de diferents tecnologies:

- Electrocardiografia de 12 derivacions, ECG

Ens mesura l'activitat elèctrica directa del cor captant la despolarització i repolarització del miocardi a través d'elèctrodes cutanis i ens permet detectar de forma immediata arrítmies, isquèmies miocardiàques silents o alteracions en la conducció elèctrica induïdes per l'esforç màxim.

- Sensor de freqüència cardíaca

Com que és inviable l'ús d'ECG per a les sessions d'entrenament diari, la FC es monitorarà de forma contínua mitjançant un sensor de FC, ja sigui una banda toràcica banda pel braç.



Il·lustració 3. Polar verity sensitive (Polar Electro, 2026)



Il·lustració 4. Sensor H 9(Polar Electro, 2024)

- Percepció de l'esforç

S'utilitzarà l'escala de Borg, 6-20, abans, just després i en finalitzar la prova per correlacionar la fatiga subjectiva amb els marcadors fisiològics.

6.2.3.4 Interpretació de les gràfiques i detecció de llindars

L'anàlisi de les dades s'estructurarà seguint el model de Wasserman per identificar el moment exacte en què el metabolisme canvia de predominantment aeròbic a anaeròbic.

Per detectar el VT1, es buscarà el punt d'inflexió on la producció de diòxid de carboni comença a augmentar més ràpidament que el consum d'oxigen VCO_2/VO_2 .

També s'identificarà el punt on l'equivalent ventilatori d'oxigen comença a pujar mentre que el del diòxid de carboni es manté estable o baixa.

Per la detecció del segon llindar ventilatori, VT2, es detectarà en el moment en què tant l'equivalent ventilatori d'oxigen com l'equivalent ventilatori de diòxid de carboni augmenten simultàniament. Alhora, hi haurà una caiguda de la pressió telexpiratòria de CO_2 indicant que el sistema respiratori ja no pot compensar l'acidosi metabòlica.

6.2.3.5 Correlació entre els llindars ventilatoris, la FC i la càrrega

En el moment en què es detecti el VT1 i el VT2, es registrarà la FC i la potència assolides.

Aquestes xifres seran les que definiran les zones d'entrenament:

- Zona 1: eficiència aeròbica i escalfament

Compresa des de la FC de repòs fins a la FC registrada al VT1. El treball en aquesta zona es manté sota el llindar de l'acumulació de lactat. S'utilitzarà durant els 5 minuts inicials del bloc d'escalfament cardiovascular per augmentar la temperatura muscular i central de forma segura, minimitzant la fatiga.

- Zona 2: transició aeròbica- anaeròbica

Delimitada en el rang de pulsacions que es troba exactament entre la FC del VT1 i la FC del VT2. Aquesta zona constitueix l'estímul principal per al bloc de resistència cardiovascular, ja que és el rang òptim per forçar adaptacions i biogènesi mitocondrial en la massa cel·lular activa del subjecte.

- Zona 3: Inestabilitat metabòlica i esforç màxima

Compresa des de la FC del VT2 fins a FC màxima absoluta assolida al final de la CPET. En aquesta zona la fatiga muscular i l'acidosi progressen de forma exponencial. En aquest protocol es denega el treball en zona 3 durant les sessions del programa d'entrenament diari, quedant reservada exclusivament per a la utilització de les dues CPET. Aquesta decisió protegeix el sistema nerviós central d'una fatiga severa i evita l'aparició d'espasmes o d'espasticitat derivats de l'esgotament elèctric.

6.2.3.6 Integració per al programa d'exercici

Tota la informació recollida a la CPET s'analitzarà amb les dades de la BIA permeten així pautar una FC d'entrenament basada en valors reals, evitant el risc de sobreestimació de les fórmules teòriques. Ens ajudarà a ajustar la càrrega externa inicial de les sessions i a monitorar la millora de l'eficiència metabòlica al final del programa.

6.2.4 Reavaluació post intervenció i entrevista final

Un cop completat el programa d'exercici físic, els subjectes se sotmetran a un protocol de reavaluació idèntic al primer. L'objectiu és quantificar-les adaptacions obtingudes i valorar la resposta i eficàcia de la intervenció mitjançant la comparació directa.

6.2.4.1 Reavaluació de la CPET i BIA

Per garantir l'objectivitat de les dades, es tornaran a repetir les proves estructurals i funcionals sota les mateixes condicions de control estandarditzades que a l'inici del programa.

Es realitzarà una nova BIA respectant el protocol de dejuni i estabilització. L'anàlisi se centrarà en la comparació de la massa muscular esquelètica i l'índex de massa musculoesquelètica per valorar la hipertròfia real i la migració del vector en el gràfic RXc juntament amb el canvi de PhA com a indicadors de la millora de la salut cel·lular.

També es durà a terme una segona CPET, en rampa, utilitzant el mateix cicloergòmetre i el mateix increment de càrrega linealitzat que en el test inicial. Es contrastarà l'evolució del VO₂peak absoluts i relatius. Alhora s'analitzaran novament les gràfiques de Wasserman per localitzar el desplaçament dels llindars ventilatoris i comprovar si s'ha assolit una major potència mecànica.

6.2.4.2 Entrevista final i avaluació qualitativa

El protocol acaba amb una entrevista individualitzada a la persona. Aquesta eina serveix per avaluar les dimensions qualitatives i conductuals del programa.

Es verificarà el grau d'assoliment de l'autonomia motora de la persona, avaluant si ha après a controlar la intensitat de l'esforç a corregir les compensacions biomecàniques i a estructurar de forma segura una sessió autònoma.

Es confrontarà el registre d'assistència amb l'experiència viscuda pel subjecte per analitzar quins elements han afavorit la consolidació de l'hàbit esportiu. Finalment, es valorarà l'impacte de la intervenció sobre l'autoestima, la gestió de l'estrès i l'autopercepció de salut general de la persona.

6.3 Protocol d'intervenció

El programa d'intervenció com s'ha esmentat anteriorment, és una combinació d'entrenament de força, estabilitat i residència aeròbica, dissenyat amb una estructura modular i flexible.

L'objectiu és optimitzar el temps de sessió i maximitzar les adaptacions neurofisiològiques sense induir un esgotament excessiu que comprometi la seguretat o l'adherència, té una duració de deu setmanes en què la primera es realitzaran l'anamnesi, la CPET i la BIA i l'última es tornarà a dur a terme aquestes dues proves més l'entrevista final per comparar l'eficàcia i beneficis d'aquest protocol.

S'organitza en quatre blocs de contingut. Tanmateix, l'aplicació d'aquests blocs no és fixa, selecció i volum dependran del nivell de resistència del subjecte, del seu grau d'afectació motora i, dels resultats de la CPET i BIA, això permet reduir la sessió a dos o tres blocs en fases inicials o en dies d'alta fatiga percebuda.

6.3.1 Estructura de les sessions

- Escalfament i activació neuromuscular

Té una durada d'uns deu minuts i s'estructura en dues fases complementàries.

S'inicia amb un exercici aeròbic lleuger en cicloergòmetre de braços o cames, amb l'objectiu d'augmentar de forma progressiva la temperatura muscular. Durant aquesta fase, es monitorarà la FC per assegurar que es mantingui en tot moment per sota del VT1.

Es continuarà amb l'execució d'exercicis de mobilitat utilitzant el mateix pes corporal o resistències elàstiques lleugeres orientats a reduir la rigidesa passiva i la hipertonia muscular abans de la fase de càrrega.

- Bloc principal

La part central de la sessió s'organitza en un màxim de quatre blocs de contingut adaptables en funció de la tolerància diària i el nivell funcional del participant. Dins de cada bloc, es pauta una estructura de circuit on s'han d'executar de forma seqüencial tres tipus d'exercicis específics, repetint aquesta seqüència al llarg dels blocs actius de la sessió. Els components són:

1. Exercici de força.
2. Exercici d'estabilitat.
3. Exercici de resistència.

- Exercici de força

Ateses les asimetries musculars i neuromusculars característiques de la PC s'optarà de manera preferent per la realització d'exercicis unilaterals.

L'aïllament de cada extremitat garanteix que ambdues parts rebin un estímul de càrrega proporcional. D'aquesta manera, s'eviten les compensacions biomecàniques involuntàries on l'extremitat no afectada assumeix la major part del treball a causa de la debilitat intrínseca del costat afectat per la discapacitat. A més, l'entrenament unilateral indueix beneficis secundaris

tals com la millora de la representació de l'esquema corporal, la potenciació de l'activació creuada i la millora de la capacitat de premsa i destresa manual.

Tanmateix, el protocol preveu la realització d'exercicis bilaterals de manera excepcional quan les condicions del subjecte ho requereixin. Com per exemple, en situacions de fatiga alta, com ara en els últims blocs de la sessió, atès que aquests requereixen una menor demanda i activació neuronal central per part de la persona i resulten significativament menys fatigants per al sistema nerviós. Quan la persona no té l'estabilitat suficient o el coneixement i la tècnica per poder realitzar l'exercici unilateralment.

Pel que fa a la progressió metodològica, al principi del programa d'intervenció es realitzaran exclusivament exercicis orientats a grans grups musculars. Atès que la dificultat coordinativa i el control motor selectiu requerit per a aquests moviments és menor, es facilita que el subjecte s'adapti a l'estímul i entengui la tècnica d'execució correctament abans de progressar cap a tasques més complexes o analítiques.

- Exercici d'estabilitat

Aquest component té com a objectiu fusionar el control postural dinàmic amb la coordinació motora. Es dissenyaran tasques d'equilibri propioceptiu en diferents bases de sustentació, combinades simultàniament amb gests coordinatius o de precisió segmentària, com llançaments, recepcions o manipulacions. L'objectiu és optimitzar la coactivació muscular i potenciar la transferència dels guanys de força cap a la funcionalitat de la marxa i les activitats de la vida diària.

- Exercici de resistència

L'objectiu principal d'aquest component és generar un estímul cardiovascular directe per pujar les pulsacions de forma controlada i potenciar la transferència de guanys de resistència a les activitats de la vida diària de la personal. Mitjançant intervals d'esforç dinàmic, es pautarà una intensitat de treball pausada entre el VT1 i el VT2 derivats de la CPET.

6.3.2 Materials per al programa

- Material de força

Manuelles de diferents pesos, politges ajustables, barres, pesos de diferents formes i mides, politges còniques, pilotes medicinals de diferents quilograms, màquines d'exercici per les diferents parts del cos, entre d'altres.

- Material d'estabilitat i coordinació

Coixins de propiocepció inestables, com fitballs, cons de senyalització i pilotes de diferents diàmetres i pesos per a l'execució de tasques combinades de control postural dinàmic i precisió segmentària.

- Resistències elàstiques progressives

Gomes elàstiques de diferents colors i rigidesa.

6.3.3 Reavaluació post-intervenció i entrevista final

Un cop completat el període temporal pautat per al programa d'exercici físic, els subjectes se sotmetran a un protocol de reavaluació idèntic al basal. L'objectiu és quantificar amb precisió les adaptacions obtingudes i valorar la resposta i eficàcia de la intervenció mitjançant la comparació directa de dades. A més un cop reavaluades les proves es realitzarà l'entrevista final.

6.3.4 Temporalització, distribució setmanal i progressió de la càrrega

La prescripció de l'exercici físic segueix el principi de progressió gradual i controlada per tal de respectar els temps d'adaptació de la persona.

La primera setmana es destinarà íntegrament a l'establiment de la línia base de diagnòstic, la seguretat de l'entrenament i la familiarització del participant amb el protocol. No es durà a terme cap sessió de càrrega física. En aquesta setmana s'iniciarà amb l'entrevista inicial i el buidatge de l'anamnesi, espai que s'aprofitarà per dur a terme una tasca d'introducció i, on s'explicarà detalladament a la persona el funcionament de la CPET i de la BIA, les fases del programa i com s'organitzaran i coordinaran logísticament les sessions. Posteriorment, es duran a terme les dues proves i s'analitzaran i valoraran per veure que és el que hem de treballar amb la persona i per determinar els límits ventilatoris.

Durant les dues setmanes següents, dos i tres, la càrrega externa i la intensitat seran baixes. En els exercicis de força, es prioritzaran exercicis de grups musculars grans o exercicis amb el mateix pes corporal sempre amb un pes lleuger per focalitzar tot el treball en l'aprenentatge motor i el control de les compensacions biomecàniques.

En els exercicis de resistència aeròbica la intensitat es guiarà, com s'ha comentat en anteriors punts, per un sensor de FC sempre per sota o al límit del VT1, assegurant un metabolisme netament oxidatiu i confortable.

A partir de la setmana quatre, i de forma lineal fins a la setmana nou, s'aplicarà un increment progressiu de les variables de volum, intensitat i dificultat.

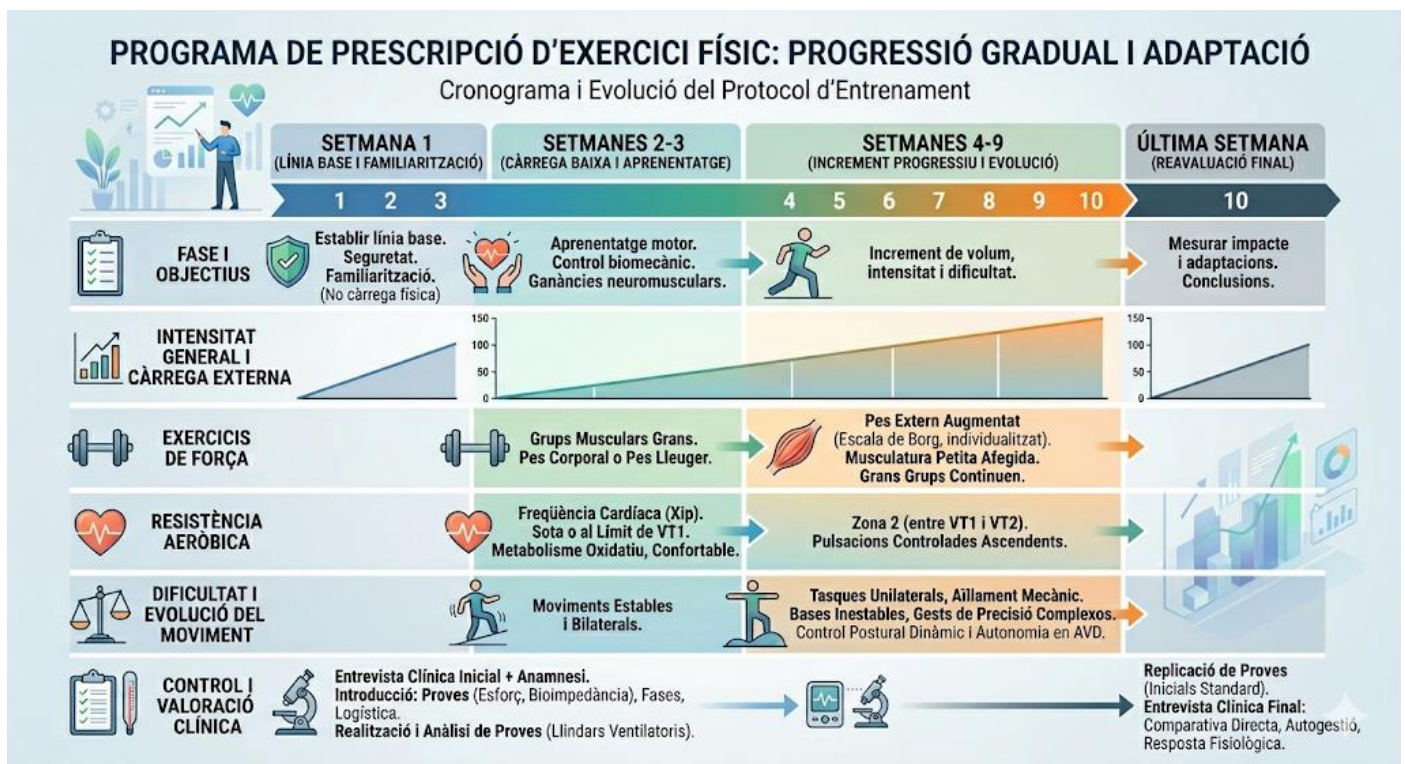
S'augmentarà el pes extern en els exercicis de força de forma individualitzada regulada per l'escala de Borg, s'afegiran exercicis que incideixen més en musculatura més petita, encara que es continuaran realitzant exercicis de grups musculars grans.

En els exercicis cardiovasculars, els intervals que monitorarem es desplaçaran cap a la zona dos, situada entre VT1 i VT2, forçant la pujada de pulsacions controlada.

La dificultat dels exercicis evolucionarà des de moviments altament estables i bilaterals cap a tasques unilaterals de gran aïllament mecànic. Així mateix, el bloc d'estabilitat passarà de superfícies estables a bases inestables combinades amb gests de precisió segmentària més

complexos, així treballarem el control postural dinàmic maximitzant la transferència cap a l'autonomia en les activitats de la vida diària.

I l'última setmana estarà destinada a la reavaluació final de la persona per mesurar l'impacte i adaptacions del programa. Es tornaran a dur a terme exactament les mateixes proves de la setmana inicial sota les mateixes condicions de control estandarditzades. Es tancarà el protocol amb l'entrevista final, dissenyada específicament per realitzar la comparació directa de tots els valors obtinguts, avaluar el grau d'autogestió assolit i extreure les conclusions definitives sobre l'eficàcia i la resposta fisiològica de la intervenció. Tota aquesta estructura queda recollida de forma visual a la il·lustració 9 on s'observa el cronograma complet i les diferents fases de progressió del programa.



Il·lustració 5. Cronograma i fases de progressió en el programa de prescripció d'exercici físic.

6.4 Aplicació pràctica

El propòsit d'aquest apartat és il·lustrar la implementació real, la viabilitat pràctica i la capacitat d'individualització del protocol dissenyat mitjançant l'exposició detallada d'un cas. A través de l'anàlisi de la línia base d'un subjecte real, es demostra com les dades creuades de la valoració estructural i funcional es tradueixen directament en la dosificació i estructuració del programa d'exercici físic.

6.4.1 Anamnesi, perfil clínic i estil de vida

Es tracta d'una persona masculina de dinou anys amb diagnòstic de PC de tipus hemiparèsia espàstica dreta, classificat com a GMFCS I, condició secundària a una lesió isquèmica prenatal a la càpsula esquerra. A l'exploració clínica i biomecànica de la marxa, el subjecte presenta una asimetria cinemàtica que alenteix la locomoció i incrementa substancialment el cost energètic de la deambulació.

Pel que fa a l'estat neuromuscular i el to basal, l'avaluació de l'escala Ashworth modificada revela un grau 1 en els flexors dels dits, la mà, el canell i el colze de l'hemicòs dret, un grau 1 a la musculatura del quàdriceps i els isquiosurals, i un grau 2 al gastrocnemi i al soli de la cama dreta.

A causa d'aquesta espasticitat al tríceps sural i a la deformitat associada en peu equí dret, el subjecte s'ha sotmès a dues intervencions quirúrgiques correctores al llarg de la seva evolució i rep un tractament focalitzat mitjançant infiltracions periòdiques de toxina botulínica cada quatre mesos, complementat amb l'ús de botes de guix seriades.

Com a productes de suport, utilitza una fèrula antirotatòria externa dreta per a la mà i un dispositiu d'ortesi pel peu i turmell fix, ambdós d'aplicació exclusivament nocturna. En les proves de coordinació segmentària i manipulació amb l'extremitat superior dreta, el subjecte manifesta una pèrdua notable de força útil i de precisió, assolint una puntuació basal de 3 en els tests motors.

Pel que fa l'estil de vida, es tracta d'un jove actiu que practica natació tres dies a la setmana. No obstant això, el subjecte no realitza ni ha realitzat mai cap mena d'entrenament de força muscular estructurat fora de l'aigua.

6.4.2 Valoració Bioimpedància

La valoració de la composició corporal es va dur a terme utilitzant l'analitzador de grau mèdic d'alta resolució BW 2.0 (Body wàter analyzer).

Troblem un PhA amb un valor molt alt, 8.1^º. Aquesta dada és superior a la mitjana de la població amb PC, es correlaciona de forma directa amb el seu perfil de nedador, indicant una elevada densitat mitocondrial, una excel·lent integritat de les membranes cel·lulars i una alta capacitat metabòlica per sostenir càrregues d'entrenament.

En concordança amb aquest valor trobem el gràfic RXc, amb una projecció del vector, situada al quadrant superior esquerre. Això confirma a gran qualitat cel·lular sistèmica de la persona de forma directa sense equacions predictives.

Per garantir la màxima precisió de la mesura i evitar qualsevol classe d'artefacte elèctric o error en l'estimulació dels teixits, es va aplicar de forma estricta el protocol clínic estandarditzat. El subjecte va acudir a la prova respectant un dejuni absolut d'aliments i begudes d'un mínim de 4 hores, assegurant així que cap procés digestiu actiu alterés la concentració d'electròlits ni concentrés el volum de sang cap al tronc.

De la mateixa manera, abans de la prova, la persona va estar en repòs en posició de decúbit supí durant un període d'entre 10 i 15 minuts.

Tot i l'elevat valor del PhA, l'anàlisi vectorial de la impedància segmentària evidencia una asimetria severa en la distribució de la massa muscular esquelètica. Passat aquest temps es van fixar els elèctrodes segmentaris de pinça i adhesius a les mans i els turmells per registrar la impedància directa a sis freqüències diferents.

S'observa un dèficit significatiu de massa cel·lular activa i volum muscular en el braç i la cama dreta en comparació amb el costat esquerre a causa de l'atròfia de desús i la miopatia de la PC.

L'estat d'hidratació i inflamació es troba en un rang de normalitat fisiològica, $<0,390$, el que descarta la presència de processos inflamatoris sistèmics aguts que contraindiquin l'aplicació immediata de sobrecàrregues mecàniques.

Es pot trobar el PhA, el gràfic RXc, l'anàlisi vectorial de la impedància segmentària, l'estat d'hidratació i inflamació, entre altres valors de la BIA a l'annex 6, resultat BIA cas pràctic.

6.4.3 Valoració de l'ergoespirometria

La CPET es va realitzar sota el protocol de rampa lineal en ciclergòmetre de cames, monitorant amb una màscara de gasos i l'activitat elèctrica cardíaca amb un ECG continu de 12 derivacions.

Amb les dades que vam extreure es va revelar una capacitat funcional molt desenvolupada gràcies a l'entrenament de natació, atenuant el deteriorament crònic del 30-40% descrit en adults joves amb PC sedentaris.

Gràcies a la utilització de la màscara de gasos, l'ECG de dotze derivacions i el seguiment de les gràfiques de Wasserman en aquesta prova ens han permès fixar les fites metabòliques reals de la persona.

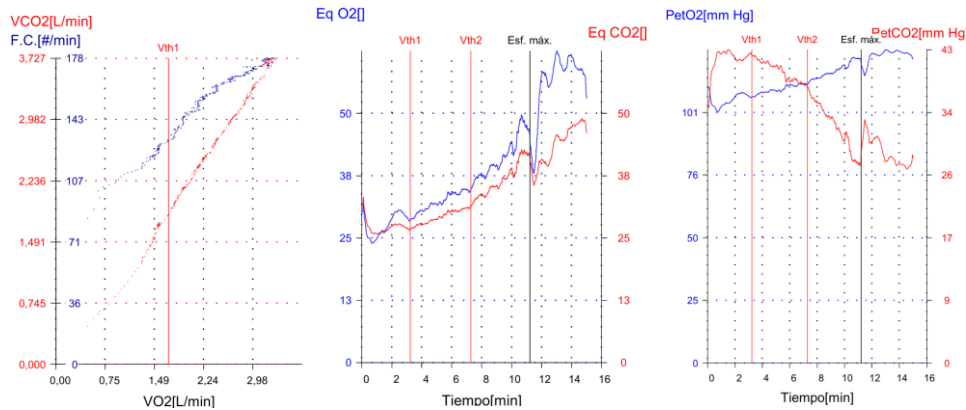
- Llindar ventilatori 1:

Es pot identificar de tres maneres:

1. Gràfica 5, mètode *V-Slope*:
Aquest és el mètode principal. S'ha de buscar el punt d'inflexió on la producció de CO_2 comença a augmentar més ràpidament que el consum d' O_2 . La relació deixa de ser lineal i el pendent es desvia cap amunt.
2. Gràfica 6, equivalents ventilatoris:
S'ha de buscar el punt exacte on Eq O_2 comença a pujar mentre que Eq CO_2 es manté estable o continua baixant lleugerament.

3. Gràfica 9, pressions de fi d'expiració:

El VT1 coincideix amb el punt on la pressió de fi d'expiració d'O₂ assoleix el seu punt més baix i comença a augmentar, mentre que la PetCO₂ es manté estable o puja una mica.



Il·lustració 6. Gràfiques 5, 6 i 9 per a la detecció del VT1

En aquest instant en què s'ha detectat el VT1 s'han registrat també les pulsacions per minut de l'ECG, 129 lpm. Aquest valor de FC marca el final del metabolisme oxidatiu i l'inici de la transició aeròbica-anaeròbica.

- Llinar ventilatori 2:

També es pot identificar a través de tres gràfiques:

1. Gràfica 6, equivalents ventilatoris:

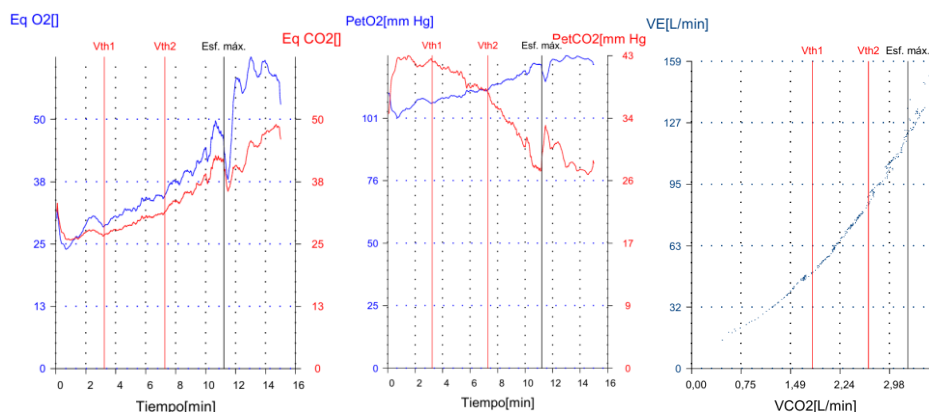
El VT2 és el punt exacte on Eq CO₂ deixa de ser estable i comença a pujar de forma sistemàtica

2. Gràfica 9, pressions de fi d'expiració:

El VT2 just en el moment en què PetCO₂ comença a caure dràsticament cap avall.

3. Gràfica 4, VE vs VCO₂

Durant bona part de la prova, els punts formen una línia recta i proporcional. El VT2 és el punt on es perd aquesta linealitat i els punts es desvien cap amunt.



Il·lustració 7. Gràfiques 6, 9 i 4 per a la detecció del VT2.

Per assegurar que no s'està enregistrant una dada incorrecta s'aplica la regla de la doble confirmació, el VT2 es dona en l'instant exacte on l'EqCO₂, gràfica 6, comença a pujar i la PeTCO₂, gràfica 9, comença a baixar.

En el mateix moment on s'ha identificat el VT2 s'ha enregistrat la FC capturada per l'ECG, 158 lpm, així sabem en quin moment el metabolisme anaeròbic és el predominant.

A partir d'aquests dos llindars ventilatoris, s'estableix la divisió de les tres zones d'entrenament, que ens guiaran amb el sensor de FC durant les sessions d'activitat física:

6.4.4 Normalització de dades

El valor absolut del consum d'oxigen pic, VO₂ peak, obtingut es normalitza directament a partir de la SMM segmental i SMI de la BIA, assegurant una lectura neta de la seva aptitud física amb relació al teixit muscular metabòlicament funcional.

6.4.5 Programa d'activitat física individualitzat

A partir de les dades obtingudes de les proves fetes, es dissenya la dosificació i estructura del circuit de vuit setmanes, tres dies a la setmana, adaptat exclusivament a les necessitats d'aquest subjecte:

- Escalfament i activació

S'executen 5 minuts de pedaleig aeròbic controlant que la FC es mantingui per sota del VT1, en zona 1, per sota de 129 lpm. Es continua amb 5 minuts de mobilitat articular i estiraments dinàmics amb gomes elàstiques enfocats en la prevenció de lesions i, específicament a reduir la rigidesa passiva i la hipertonia.

- Exercicis de força

Les primeres setmanes es prescriuen exercicis multiarticulars de grans grups musculars i a mesura que van passant les setmanes més analítics. La majoria executats de forma unilateral, com poden ser la premsa unilateral, rem a una mà, extensions de genoll, entre d'altres.

Per contrarestar la fatiga central o si es manifesta una pèrdua de control tècnic en els darrers blocs del circuit, el protocol preveu moviments bilaterals estables per reduir l'estrès.

- Exercicis d'estabilitat

S'estructuren tasques de control postural sobre bases inestables, fitball, bosu, etc, coordinades simultàniament amb gests de precisió manual, llançaments, recepcions, entre d'altres. L'objectiu és incidir sobre la coordinació i integrant l'hemicòs afectat, potenciant la destresa útil per a les activitats de la vida diària.

- Exercicis de resistència

Els intervals cardiovasculars es pautaran perquè la FC estigui en zona 2, entre 129 lpm i 156 lpm. Evitant superar el VT2 per no generar una fatiga central o augmentar l'espasticitat.

Atès que el subjecte no té antecedents d'entrenament de força el protocol respectarà la fase d'aclimatació. Durant les setmanes 2 i 3 el volum de repeticions serà alt però amb una intensitat i un caràcter de l'esforç molt baixos, centrant tota l'atenció en la higiene postural i el control de les compensacions. A partir de la setmana 4, s'iniciarà una sobrecàrrega progressiva augmentant el pes extern en la força, augmentant les dificultats en els exercicis i traslladant els pics de resistència de forma continuada cap a la meitat superior de la Zona 2.

Finalment, a la setmana final es replicaran la CPET i BIA per avaluar la millora del subjecte, comparant les dades de les proves de la primera setmana amb l'última, tancant amb l'entrevista clínica final per mesurar el guany d'autoestima, l'autogestió de l'esforç i el nivell d'implicació funcional de la seva meitat dreta en el dia a dia.

7. RESULTATS ESPERATS I CRITERIS DE RESPOSTA O EFICÀCIA

Aquest punt estableix la projecció teòrica de les adaptacions fisiològiques i estructurals esperades, així com els marcadors objectius que determinaran l'èxit i l'eficàcia del tractament un cop implementat en la població diana.

7.1 Adaptacions fisiològiques

- Optimització del consum d'oxigen
S'espera un increment significatiu del VO2 peak, mitigant el dèficit del 30-40% que la literatura descriu en adults amb PC respecte a la població sense patologia neurològica.
- Retard de la fatiga
Mitjançant el treball aeròbic ajustat a la FC d'entrenament, s'espera un desplaçament cap a la dreta del VT1. Això significarà que la persona serà capaç de generar una major potència mecànica abans d'entrar en metabolisme predominantment anaeròbic.
- Millorar el control autonòmic
Es preveu una atenuació de la incompetència cronotròpica, evidenciada per una millor reactivació parasimpàtica i, conseqüentment, un descens més ràpid de FC de recuperació post-esforç.

7.2 Adaptacions estructurals i tissulars

- Integració funcional i activitats de la vida diària
Es preveu una major implicació, destresa i ús espontani de l'extremitat i/o hemicòs afectat en l'execució de les tasques quotidianes.
- Millora en el patró de marxa
Els guanys de força i l'entrenament d'estabilitat i coordinació es transferiran cap a una millor cinemàtica de la marxa i un control postural òptim tant al domicili com en entorns comunitaris.
- Increment de la qualitat cel·lular i migració del vector RXc
A nivell estructural, s'espera un augment del PhA com a reflex d'una major densitat mitocondrial i una millora en la integritat de la membrana cel·lular de la musculatura parètica. També s'espera una migració del vector RXc cap amunt i a l'esquerra, evidenciant de forma gràfica i directa l'increment de la massa cel·lular activa i la millora cel·lular.
- Hipertròfia funcional i simetria
Mitjançant el treball de força s'espera un augment de l'índex de massa musculoesquelètica i una reducció de l'asimetria de la massa cel·lular activa entre l'hemicòs afectat i el no afectat.

- Optimització de la massa adiposa
En funció de la composició corporal basal de la persona, s'espera una reducció de la massa grassa absoluta i del greix visceral. Aquesta pèrdua adiposa ens ajudarà a millorar l'economia de la marxa i reduint la sobrecàrrega articular durant la locomoció.
- Control de l'estat inflamatori
S'espera mantenir o reduir la ràtio d'edema extracel·lular confirmant que la dosi de càrrega no ha generat inflamació sistèmica ni dany tissular excessiu.

7.3 Adaptacions clíniques i psicosocials

- Millora de l'autoestima i benestar
L'increment de l'autonomia motora, sumat a l'apoderament que proporciona l'autogestió de l'exercici, induirà un impacte psicològic positiu, augmentant de forma significativa l'autoestima, la percepció d'autoeficàcia i la qualitat de vida global de la persona.
- Empoderament i capacitat d'autogestió
Mitjançant la integració de la psicoeducació, s'espera que la persona compregui els beneficis del protocol i adquireixi els coneixements pràctics bàsics per poder replicar, adaptar i mantenir de forma autònoma i segura les seves rutines d'exercici un cop finalitzat el programa clínic.
- Consolidació de l'hàbit i adherència
Es preveu assolir una taxa d'adherència alta, demostrant que una dosificació de la intensitat basada en l'indadors reals genera una experiència d'entrenament còmoda, agradable i motivant.

7.4 Criteris de resposta i marcadors d'eficàcia

Per tal d'avaluar de manera objectiva si s'han assolit els objectius del protocol, s'estableixen els següents marcadors de caràcter quantitatiu i qualitatiu:

- Indicadors fisiològics i estructurals
 - Criteri per la CPET: increment ≥ 5 -10% en la potència mecànica o en el consum d'oxigen en el punt d'aparició del VT1, demostrant un retard real de la fatiga.
 - Criteri BIA: migració positiva del vector d'impedància cap al quadrant superior esquerre en el gràfic RXc i un augment del PhA, acompanyat d'un increment de la SMM.
- Indicadors comportamentals i psicosocials
 1. Registre d'adherència: assistència i compliment complet d'un mínim del 80% de les sessions pautades.
 2. Avaluació autogestió: capacitat del subjecte per descriure els principis bàsics de seguretat, intensitat i selecció d'exercicis per a la seva pràctica autònoma.
 3. Impacte psicosocial: increment en els nivells d'autoestima i benestar psicològics recollits a través de qüestionaris de qualitat de vida autoinformatos post-intervenció.

8. VALORACIÓ CRÍTICA I CONCLUSIONS DEL PROCÉS D'APRENTATGE

El disseny d'aquest protocol clínic representa un pas endavant en la intersecció entre les ciències de l'activitat física i l'esport i la neurologia.

Analitzant els seus avantatges, el principal punt fort de la proposta radica en l'objectivitat que ofereix en rebutjar les fórmules teòriques predictives tradicionals, i apostar en el seu lloc per fites metabòliques reals obtingudes directament de la CPET. Aquest enfocament elimina el risc de sobrecàrrega cardiovascular en una població amb una clara tendència a patir incompetència cronotròpica.

Per contra, l'honestetat científica exigeix avaluar amb rigor les limitacions inherents a la implementació pràctica d'aquest protocol. En primer lloc, es fa per una dependència tecnològica i un elevat cost econòmic associat a la necessitat d'equips de diagnòstic d'alta gamma, com els analitzadors de gasos per a la CPET o els dispositius de BIA com el BWA 2.0 i els models InBody S10 o 770. Aquesta barrera restringeix notablement l'aplicació d'aquest mètode a hospitals o centres de recerca avançada, limitant-ne la transferència immediata a gimnasos comunitaris o associacions de persones amb menys recursos. En segon lloc, es requereix la presència de personal altament especialitzat; el protocol exigeix un graduat en CAFiE amb una formació en el sector de la neurorehabilitació, capaç d'interpretar les gràfiques de Wasserman, calibrar les directrius de posicionament elèctric davant d'alteracions estructurals complexes.

8.1 Conclusions de la proposta i futures línies de recerca

Com a conclusió general, el protocol proposat demostra ser una eina metodològicament robusta, viable i altament individualitzat per a la millora de la capacitat funcional, l'optimització de la qualitat del teixit muscular i el foment de l'autonomia en persones amb PC. L'evidència obtinguda en l'entorn clínic real confirma que aquest nivell de precisió i control de la intensitat mitjançant llindars ventilatoris reals és el factor clau que permet assolir taxes d'adherència al tractament excel·lents, xifrades en un 95%, sense provocar efectes adversos sobre el to espàstic dels usuaris.

De cara a futures línies de recerca, es planteja moure aquest cas pilot inicial cap a la realització d'un assaig clínic aleatoritzat que aporti major potència estadística i universalitat als resultats estructurals i metabòlics descrits. Paral·lelament, investigar i dissenyar models de validació de camp de baix cost que busquin la correlació entre les dades obtingudes amb aquesta maquinària *gold standard* i eines o dispositius portàtils més assequibles, facilitant així la descentralització d'aquest rigor científic i estenent els beneficis de la intervenció a totes les persones amb menys recursos econòmics.

8.2 Conclusions del procés d'aprenentatge i reflexió professional

En conclusió, el disseny d'aquest protocol clínic reafirma la premissa fonamental que l'activitat física ha d'anar junts no només de la PC, sinó de qualsevol classe de discapacitat. Si bé els guanys estructurals i fisiològics com l'optimització del consum d'oxigen o l'increment de la massa muscular són evidents i necessaris, l'impacte més transcendent d'aquesta intervenció radica en la dimensió psicològica. L'exercici físic pautat amb precisió potencia al cent per cent l'autoestima, l'autoeficàcia i la salut emocional, convertint el benestar mental en el benefici més important per a l'apoderament real de la persona en la seva vida diària.

En l'àmbit d'aprenentatge, el desenvolupament d'aquest treball ha permès comprendre i interpretar amb una claredat molt més gran com funciona el cos d'una persona amb PC quan és sotmès a l'estrès físic d'un esforç màxim o d'una càrrega de força. He entès que fenòmens com la incompetència cronotròpica o les alteracions constants en la dinàmica de fluids i en la rigidesa passiva muscular no són barreres per a l'alta intensitat, sinó paràmetres que exigeixen aplicar una metodologia de precisió clínica.

Entre la lesió neurològica i la resposta fisiològica es demostra que és possible trencar els estigmes clàssics de fragilitat associats a la discapacitat si s'aporta un rigor científic.

“Declaro que en l'elaboració d'aquest treball he utilitzat eines d'intel·ligència artificial generativa, específicament Gemini, ChatGPT i Softcatalà, per a la millora de la redacció, correcció, idees i il·lustracions, i indico a continuació quines il·lustracions i amb quina eina s'han produït ([il·lustració 5 – IA Gemini], [il·lustració 15 – IA Gemini]); així mateix, confirmo que he revisat tot el contingut assistit per IA i que les aportacions originals del treball són pròpies.”

9. REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- Alila Medical Media en Español. (2016, octubre 5). *ECG de 12 Derivaciones Explicado, Animación. Alila Medical Media Español*. [Vídeo en línea]. YouTube.
https://www.youtube.com/watch?v=DS_cCJ7Prxg
- Balemans, A. C. J., Van Wely, L., De Heer, S. J. A., Van Den Brink, J., De Koning, J. J., Becher, J. G., & Dallmeijer, A. J. (2013). Maximal Aerobic and Anaerobic Exercise Responses in Children with Cerebral Palsy. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 45(3), 561-568.
<https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3182732b2f>
- Gąsior, J. S., Zamunér, A. R., Silva, L. E. V., Williams, C. A., Baranowski, R., Sacha, J., Machura, P., Kochman, W., & Werner, B. (2020). Heart Rate Variability in Children and Adolescents with Cerebral Palsy—A Systematic Literature Review. *Journal of Clinical Medicine*, 9(4), 1141. <https://doi.org/10.3390/jcm9041141>
- González-Álamos, M., Delgado-Gallén, S., Rivas, N., Figueroa, C., Ochoa, M., & Javierre, C. (2025). *Programa de ejercicio físico estructurado e individualizado en neurorehabilitación* [Pòster]. XIII Congreso Internacional de la Asociación Española de Ciencias del Deporte, Elche.
- Graham, H. K., Rosenbaum, P., Paneth, N., Dan, B., Lin, J.-P., Damiano, D. L., Becher, J. G., Gaebler-Spira, D., Colver, A., Reddihough, D. S., Crompton, K. E., & Lieber, R. L. (2016). Cerebral palsy. *Nature Reviews Disease Primers*, 2(1), 15082. <https://doi.org/10.1038/nrdp.2015.82>
- Gurka, M. J., Kuperminc, M. N., Busby, M. G., Bennis, J. A., Grossberg, R. I., Houlihan, C. M., Stevenson, R. D., & Henderson, R. C. (2010). Assessment and correction of skinfold thickness equations in estimating body fat in children with cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 52(2).
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2009.03474.x>
- h/p/cosmos sports & medical. (2017). *Cicloergómetro—Torqualizer ef med 600—H/p/cosmos sports & medical* [Página de producto]. MedicalExpo.

<https://www.medicalexpo.es/prod/h-p-cosmos-sports-medical/product-68662-1066553.html>

InBody. (2026). *InBody S10—Medical Grade Body Water Analyzer* [Especificacions tècniques]. InBody. InBody. <https://inbodyasia.com/product/inbody-s10/>

InBody Canada. (2026). *BWA 2.0 Body Water Analyzer—InBodyCanada* [Catálogo de producto]. InBody. InBody Canada. <https://inbodycanada.ca/products/bwa-2-0-body-water-analyzer>

InBody Co., Ltd. (2020). *InBody S10 User's Manual*. InBody Co., Ltd.

Kyle, U. (2004). Bioelectrical impedance analysis?part I: review of principles and methods. *Clinical Nutrition*, 23(5), 1226-1243.
<https://doi.org/10.1016/j.clnu.2004.06.004>

Lieber, R. L., & Fridén, J. (2019). Muscle contracture and passive mechanics in cerebral palsy. *Journal of Applied Physiology*, 126(5), 1492-1501.
<https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00278.2018>

López Chicharro, José. (amb Fernández Vaquero, A.). (2006). *Fisiología del ejercicio* (Tercera edición. Tercera reimpresión). Médica Panamericana.

Marquez, J. C., Seoane, F., & Lindecrantz, K. (2011). Skin-electrode contact area in electrical bioimpedance spectroscopy. Influence in total body composition assessment. *2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 1867-1870.
<https://doi.org/10.1109/IEMBS.2011.6090530>

McArdle, W. D. (2015). *Fisiología del ejercicio*. Wolters Kluwer Health.

Myers, J., Buchanan, N., Walsh, D., Kraemer, M., McAuley, P., Hamilton-Wessler, M., & Froelicher, V. F. (1991). Comparison of the ramp versus standard exercise protocols. *Journal of the American College of Cardiology*, 17(6), 1334-1342.
[https://doi.org/10.1016/S0735-1097\(10\)80144-5](https://doi.org/10.1016/S0735-1097(10)80144-5)

Novak, I., Morgan, C., Adde, L., Blackman, J., Boyd, R. N., Brunstrom-Hernandez, J., Cioni, G., Damiano, D., Darrah, J., Eliasson, A.-C., De Vries, L. S., Einspieler,

- C., Fahey, M., Fehlings, D., Ferriero, D. M., Fethers, L., Fiori, S., Forssberg, H., Gordon, A. M., ... Badawi, N. (2017). Early, Accurate Diagnosis and Early Intervention in Cerebral Palsy: Advances in Diagnosis and Treatment. *JAMA Pediatrics*, 171(9), 897. <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2017.1689>
- Novak, I., Morgan, C., Fahey, M., Finch-Edmondson, M., Galea, C., Hines, A., Langdon, K., Namara, M. M., Paton, M. C., Popat, H., Shore, B., Khamis, A., Stanton, E., Finemore, O. P., Tricks, A., Te Velde, A., Dark, L., Morton, N., & Badawi, N. (2020). State of the Evidence Traffic Lights 2019: Systematic Review of Interventions for Preventing and Treating Children with Cerebral Palsy. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, 20(2), 3. <https://doi.org/10.1007/s11910-020-1022-z>
- Palisano, R., Rosenbaum, P., Walter, S., Russell, D., Wood, E., & Galuppi, B. (1997). Development and reliability of a system to classify gross motor function in children with cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 39(4), 214-223. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1997.tb07414.x>
- Piccoli, A., Rossi, B., Pillon, L., & Bucciante, G. (1994). A new method for monitoring body fluid variation by bioimpedance analysis: The RXc graph. *Kidney International*, 46(2), 534-539. <https://doi.org/10.1038/ki.1994.305>
- Pingel, J., Harrison, A., Von Walden, F., Hjalmarsson, E., & Bartels, E. M. (2020). Multi-frequency bioimpedance: A non-invasive tool for muscle-health assessment of adults with cerebral palsy. *Journal of Muscle Research and Cell Motility*, 41(2-3), 211-219. <https://doi.org/10.1007/s10974-020-09579-2>
- Reid, S. M., Carlin, J. B., & Reddiough, D. S. (2011). Using the Gross Motor Function Classification System to describe patterns of motor severity in cerebral palsy: Motor Severity in CP. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 53(11), 1007-1012. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2011.04044.x>
- Slaman, J., Bussmann, J., Van Der Slot, W. M., Stam, H. J., Roebroek, M. E., & Van Den Berg-Emons, R. J. (2013). Physical Strain of Walking Relates to Activity

- Level in Adults With Cerebral Palsy. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 94(5), 896-901. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2012.11.005>
- Smith, L. R., Chambers, H. G., & Lieber, R. L. (2013). Reduced satellite cell population may lead to contractures in children with cerebral palsy. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 55(3), 264-270. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12027>
- Smith, L. R., Lee, K. S., Ward, S. R., Chambers, H. G., & Lieber, R. L. (2011). Hamstring contractures in children with spastic cerebral palsy result from a stiffer extracellular matrix and increased *in vivo* sarcomere length. *The Journal of Physiology*, 589(10), 2625-2639. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.203364>
- Stallings, V. A., Cronk, C. E., Zemel, B. S., & Charney, E. B. (1995). Body composition in children with spastic quadriplegic cerebral palsy. *The Journal of Pediatrics*, 126(5), 833-839. [https://doi.org/10.1016/S0022-3476\(95\)70424-8](https://doi.org/10.1016/S0022-3476(95)70424-8)
- Unnithan, V. B., Dowling, J. J., Frost, G., & Bar-Or, O. (1996). Role of cocontraction in the O₂ cost of walking in children with cerebral palsy: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 28(12), 1498-1504. <https://doi.org/10.1097/00005768-199612000-00009>
- Verschuren, O., Ketelaar, M., Keefer, D., Wright, V., Butler, J., Ada, L., Maher, C., Reid, S., Wright, M., Dalziel, B., Wiart, L., Fowler, E., Unnithan, V., Maltais, D. B., Van Den Berg-Emons, R., & Takken, T. (2011). Identification of a core set of exercise tests for children and adolescents with cerebral palsy: A Delphi survey of researchers and clinicians: Core Set of Exercise Tests for Children with CP. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 53(5), 449-456. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2010.03899.x>
- Verschuren, O., Peterson, M. D., Balemans, A. C. J., & Hurvitz, E. A. (2016). Exercise and physical activity recommendations for people with cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 58(8), 798-808. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13053>

- Verschuren, O., & Takken, T. (2010). Aerobic capacity in children and adolescents with cerebral palsy. *Research in Developmental Disabilities*, 31(6), 1352-1357.
<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2010.07.005>
- Wasserman, K. (2005). *Principles of Exercise Testing and Interpretation: Including Pathophysiology and Clinical Applications*. Lippincott Williams & Wilkins.
https://books.google.es/books?id=y_pfyYtYKmwC
- Więch, P., Ćwirlej-Sozańska, A., Wiśniowska-Szurlej, A., Kilian, J., Lenart-Domka, E., Bejer, A., Domka-Jopek, E., Sozański, B., & Korczowski, B. (2020). The Relationship between Body Composition and Muscle Tone in Children with Cerebral Palsy: A Case-Control Study. *Nutrients*, 12(3), 864.
<https://doi.org/10.3390/nu12030864>
- Wijnhoud, E. J., Bos, A. M. M. E., Buizer, A. I., & Beckerman, H. (2024). Aerobic fitness in children with cerebral palsy compared to typically developing peers: A systematic review and meta-analysis. *Brazilian Journal of Physical Therapy*, 28(6), 101142. <https://doi.org/10.1016/j.bjpt.2024.101142>

10. ANNEXOS

ANNEX 1: Nomenclatura

- PC: Paràlisi Cerebral
- CPET: Ergoespirometria
- BIA: Bioimpedància
- FC: Freqüència cardíaca
- VO2peak: consum d'oxigen pic
- 6MWT: 6-Minute Walk Test
- VT1: Primer llindar ventilatori
- VT2: Segon llindar ventilatori
- PhA: Angle de fase
- GMFCS: Gross Motor Function Classification System
- TBW: Aigua corporal total
- ICW: Intracel·lular
- ECW: Extracel·lular
- SMM: Massa muscular esquelètica
- SMI: Índex de massa musculoesquelètica
- ECG: Electrocardiografia
- ACSM: American college of sports medicine

ANNEX 2. Tipus de cicloèrgometres escollits per la realització de la CPET

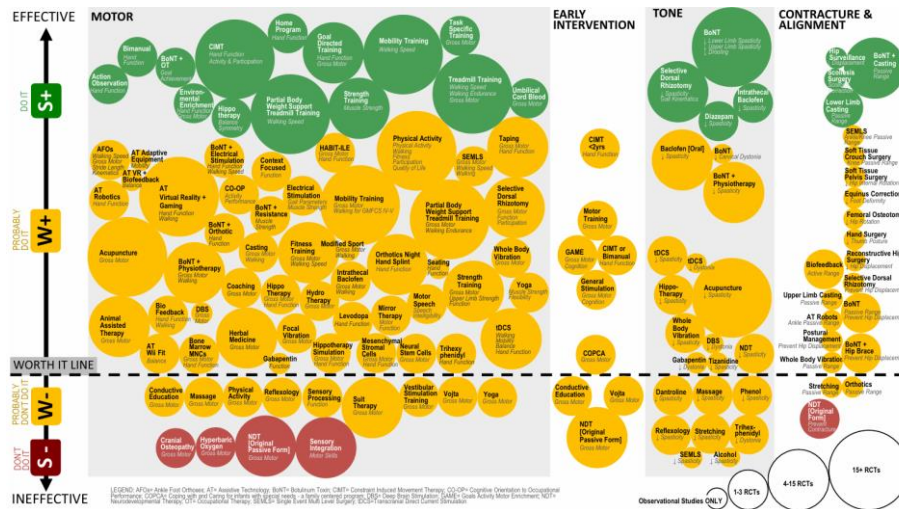


*Il·lustració
braços (/cosmos sports & medical, 2017).*

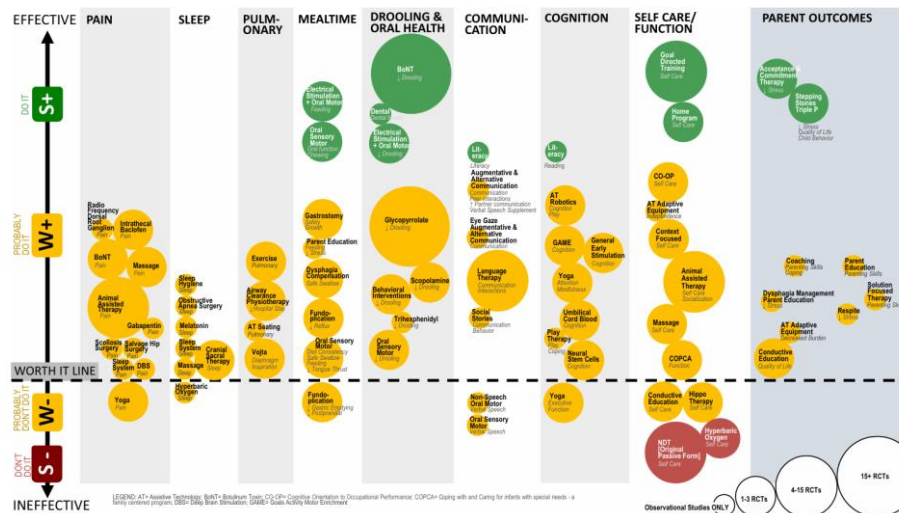


9. Cicloèrgometre de
*Il·lustració 8. Cicloèrgometre de
cames (HealthCare International,
s.d.)*

ANNEX 3. Evidència científica de la proposta



Il·lustració 10. Sistema de semàfor de l'estat de l'evidència per a intervencions clíniques (Novak et al., 2020) .



Il·lustració 11. Classificació de les intervencions neurorehabilitadores segons l'eficàcia i el volum d'evidència científica (Novak et al., 2020).

ANNEX 4. Tipus de bioimpedàncies utilitzades

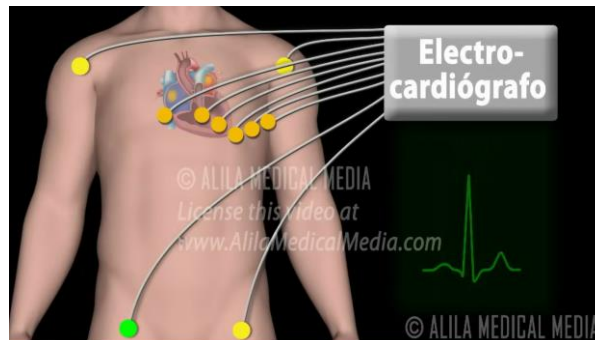


Il·lustració 12. InBody BWA 2.0 (InBody Canada, 2026)



Il·lustració 13. InBody s10 (InBody, 2026)

ANNEX 5 . ECG de dotze derivacions



Il·lustració 14. Electrocardiògraf (Alila Medical Media en Español, 2016)

ANNEX 5. Informe subjecte cas pràctic

Informe rehabilitació

COMENTARI

19-year-old male patient with cerebral palsy of the right spastic hemiparesis type with GMFCS I secondary to an ischemic lesion in the left capsule produced in the prenatal period. It is controlled periodically in the Children's Rehabilitation and Cerebral Palsy Unit of our center since 2005. It presents an asymmetry during the gait that makes it slower and more expensive. The manipulation with the right upper extremity presents a decrease in strength and precision. The increase in muscle tone according to the Ashworth scale in fingers and hands, wrist and elbow of 1 and in hamstrings, quadriceps of 1 and in gastrocnemius and soleus of 2. In the coordination test it reaches a score of 3. During its evolution, it has been infiltrated on several occasions to reduce spasticity in triceps surae D and equinus foot deformity D that required orthotics for a while and had to be surgically corrected on two occasions. Currently, foot I shows a tendency to recurrence of equinus due to loqui, it is again subjected to infiltrations with botulinum toxin every 4 months and plaster boots. . Please take into consideration the physical situation of this patient in order to categorize him in future sports competitions.

Dra. Mar Meléndez Plumed
Especialista en Medicina Física y Rehabilitación
Unidad de Rehabilitación Infantil y Parálisis Cerebral
Hospital Universitario Vall d' Hebron
30-11-2022

Il·lustració 15. Diagnòstic clínic persona amb PC GMFCS I

ANNEX 6. Resultats BIA cas pràctic

Resumen de composición corporal

	MLG Masa magra	MG	AIC	AEC	ACT	AEC/ACT
Brazo Derecho	2.96 kg	0.4 kg	1.46 L	0.84 L	2.30 L	0.365
Brazo Izquierdo	3.28 kg	0.3 kg	1.60 L	0.95 L	2.55 L	0.374
Tronco	24.9 kg	4.4 kg	12.10 L	7.2 L	19.3 L	0.372
Pierna Derecha	7.43 kg	1.3 kg	3.62 L	2.15 L	5.77 L	0.372
Pierna Izquierda	8.34 kg	1.5 kg	4.11 L	2.35 L	6.46 L	0.365
Cuerpo entero	54.0 kg	9.0 kg	24.9 L	14.6 L	39.5 L	0.370
Peso		63.0 kg				

* La diferencia entre los valores de todo el cuerpo y la suma de los valores segmentarios son de la región craneocervical.

Ángulo de fase corporal segmental

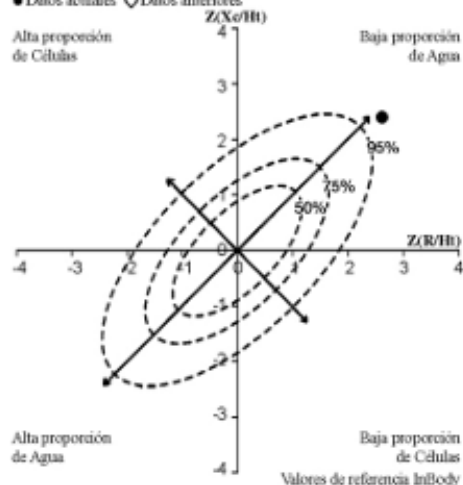
Proximal	BD	BI	TR	PD	PI
$\phi(^{\circ})$ 5 kHz	4.5	4.3	4.6	3.3	3.7
50 kHz	8.1	7.3	8.7	8.0	9.3
250 kHz	6.0	5.7	8.1	6.1	6.9

Il·lustració 17. Angle de fase corporal

Il·lustració 16. Resum de la composició corporal

Análisis Vectorial de Impedancia Bioeléctrica

● Datos actuales ◊ Datos anteriores



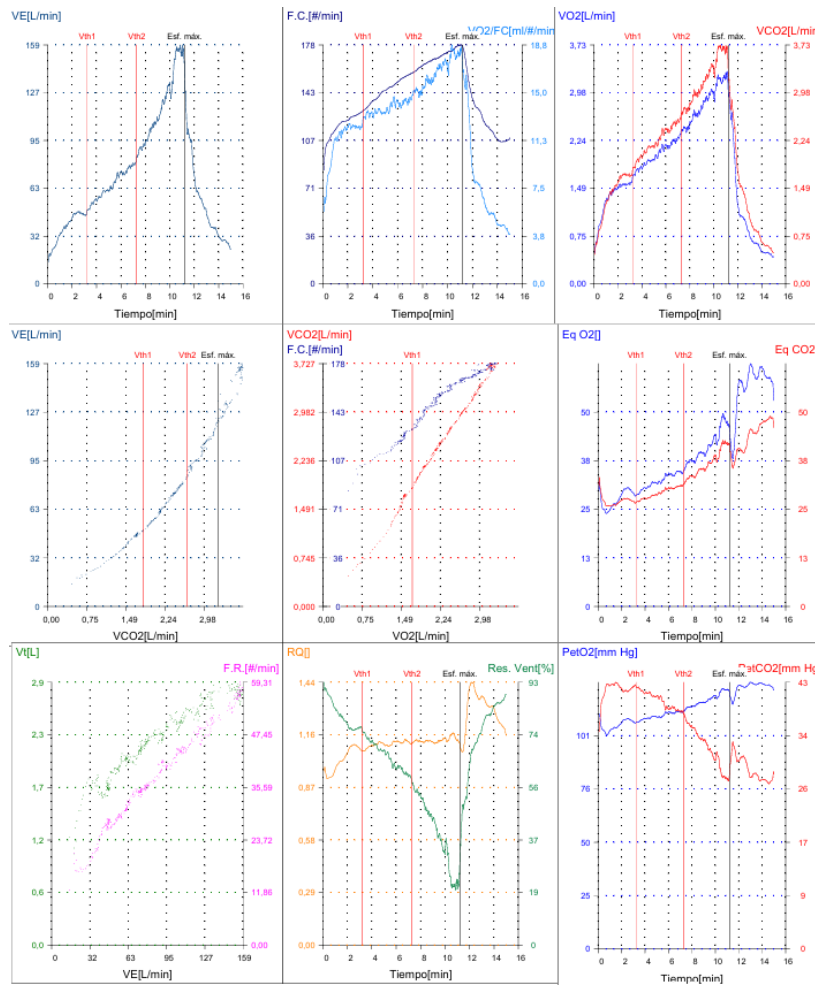
Il·lustració 17. Gràfic RXc

Análisis de la proporción AEC

	Bajo	Normal	Alto
Relación de AEC	0.320 0.340 0.360 0.380 0.390 0.400 0.410 0.420 0.430 0.440 0.450	0.370	

Il·lustració 16. Ràtio d'edema (ECW/TBW)

ANNEX 7. Resultats cas pràctic



Il·lustració 18. Nou gràfiques de Wasserman del cas pràctic.

	Vo2 máx.		Basal	Vth1	Vth1	Vth2	Vth2	Vo2 máx.	Vo2 máx.	Rec. 1'	Rec. 3'
	Teor.	Medido		Medido	% Vo2 máx.	Medido	% Vo2 máx.	Medido	% Teor.	Medido	Medido
Tiempo min	----	01:17	03:14	29%	07:17	66%	11:06	----	12:13	14:14	
Carga Watt	229	0	108	53%	156	76%	204	89%	0	0	
Velocidad m/h	----	0	0	----	0	----	0	----	0	0	
Elevació%	----	0	0	----	0	----	0	----	0	0	
VO2 L/min	2,722	0,330	1,703	51%	2,403	72%	3,319	122%	1,053	0,490	
VO2/kg ml/min/kg	42,3	5,1	26,5	51%	37,4	72%	51,6	122%	16,4	7,6	
VO2/FC ml/#/min	13,8	5,2	13,2	71%	15,2	82%	18,6	135%	7,9	4,6	
F.C. #/min	192	64	129	73%	158	89%	178	93%	132	106	
RQ	----	0,98	1,07	95%	1,11	99%	1,12	----	1,44	1,25	
VE L/min	196,80	10,20	48,93	31%	84,23	54%	156,28	79%	60,97	29,27	
F.R. #/min	----	9,63	26,33	47%	36,60	65%	56,37	----	32,53	25,59	
Res. Vent%	----	95	75	365%	57	278%	21	----	69	85	
Vda L	----	32,29	31,12	117%	29,48	111%	26,53	----	26,96	19,08	
Vt L	----	1,059	1,910	67%	2,341	82%	2,863	----	1,922	1,151	
Vd/Vt	----	0,15	0,15	120%	0,19	149%	0,12	----	0,23	0,27	
Eq O2	----	30,9	28,7	61%	35,1	74%	47,1	----	57,9	59,8	
Eq CO2	----	31,4	26,9	64%	31,6	75%	42,1	----	40,2	47,8	
PetCO2 mm Hg	----	37	42	155%	38	139%	27	----	31	27	
PetO2 mm Hg	----	110	107	87%	112	92%	122	----	124	125	
TV/IC %	----	0,0	0,0	----	0,0	----	0,0	----	0,0	0,0	
Vt/FVC %	----	0,0	0,0	----	0,0	----	0,0	----	0,0	0,0	

Il·lustració 19. Correlació VT amb FC.



Il·lustració 20. Zones d'entrenament i vies energètiques

ANNEX 8. Escala de ashworth modificada Borg

0	• No increase in tone
1	• Slight increase in tone • Catch/release at end ROM
1+	• Slight increase in tone • Catch/release and resistance through rest ROM (1/2 ROM)
2	• More marked increase in tone through ROM, but affected part moved easily
3	• Considerable increase in tone, passive movement difficult
4	• Affected part in rigid flexion and extension

Il·lustració 21. Escala de ashworth modificada

ANNEX 9. Escala Borg

6-7	MUY MUY SUAVE	😊
8-9	MUY SUAVE	😊
10-11	SUAVE	😊
12-13	REGULAR	😊
14-15	FUORTE	😓
16-17	MUY FUORTE	😓
18-19-20	MUY MUY FUORTE	😓

Il·lustració 22. Escala Borg.