

TREBALL FINAL DE GRAU

Grau en Ciències de l'Activitat Física i de l'Esport
Escola Universitària de la Salut i l'Esport (EUSES), Centre adscrit a la Universitat de Girona

COMPARACIÓ DELS EFECTES D'UN PROTOCOL DE TREBALL NEUROMUSCULAR INTEGRAT VERSUS UN PROTOCOL DE TREBALL DE FORÇA AMB SOBRECÀRREGA EXCÈNTRICA SOBRE LA COORDINACIÓ INTER- MUSCULAR EN ADULTS JOVES SANS

Jordi Parramon Vilà

Curs acadèmic: [2020-2021]

Tutor/a de l'EUSES: Sergi Garcia Retortillo

Data d'entrega: 04/06/2021

ÍNDEX

RESUM.....	3
1. INTRODUCCIÓ.....	4
1.1 “Network physiology”	4
1.2 “Network Physiology of Exercise”	5
1.3 Connexió múscul - sistema nerviós.....	7
1.3.1 El múscul	7
1.3.2 Les fibres musculars	7
1.3.3 La unitat motora.....	8
1.3.4 Sistema neuromuscular.....	8
1.3.5 Fisiologia del sistema neuromuscular en el control del moviment	9
1.4 Coordinació inter-muscular.....	10
1.4.1 Mètodes de mesura de coordinació inter-muscular.....	10
1.5 Limitacions de la “inter-muscular coherence”	12
1.6 Metodologies d’entrenament i coordinació inter-muscular.....	12
1.7 Buit de coneixement	14
2 HIPÒTESI I OBJECTIUS.....	16
2.1 Hipòtesi	16
2.2 Objectius	16
3 METODOLOGIA.....	17
3.1 Participants.....	17
3.1.1 Criteris d’inclusió i d’exclusió	17
3.1.2 Detall de la mostra	17
3.1.3 Tamany de la mostra i tècnica de mostreig	17
3.1.4 Selecció i formació d’avaluadors i aplicadors	18
3.1.5 Comitè d’ètica	18
3.2 Intervenció	19
3.2.1 Variables d’estudi.....	19
3.2.2 Instruments d’avaluació.....	19
3.2.3 Protocol d’avaluació.....	20
3.2.4 Protocols d’intervenció	20
3.3 Anàlisi de dades.....	24
3.4 Cronograma.....	25
3.5 Pressupost.....	26
4 BIBLIOGRAFIA	27

RESUM

L'estudi de la fisiologia humana es tendeix a concebre des d'una perspectiva horitzontal, de les estructures cel·lulars fins als òrgans. Recentment i gràcies a l'aparició de la "Network physiology" i la "Network physiology of exercise", s'ha introduït una nova aproximació a la fisiologia humana, vinculada a una perspectiva horitzontal, que pretén entendre el funcionament del cos humà a través de l'estudi i quantificació de les interaccions dinàmiques dels seus components.

Gràcies a conceptes físics i matemàtics aplicats, s'ha aconseguit extreure senyals encapsulades en components de l'organisme humà que han permès detallar interaccions dinàmiques entre ells. En són bon exemples les variacions de la coordinació cardio-respiratòria en les diferents fases del son i en esforç, la coordinació entre hemisferis cerebrals o la coordinació inter-muscular.

Precisament, si parlem de la coordinació inter-muscular, alguns dels mètodes que inclouen aquests conceptes físics i matemàtics per tal de quantificar-la són la "inter-muscular coherence" i les "cross correlations", les quals en base a senyals electromiogràfiques intenten quantificar les interaccions entre diferents músculs a través d'un domini freqüencial o temporal.

El present estudi pretén comparar l'efecte d'un protocol d'entrenament amb sobrecàrrega excèntrica (sEXC) versus un protocol d'entrenament de treball neuromuscular integrat (TNI) sobre la coordinació inter-muscular en adults joves sans, a través d'un mètode de "cross-correlations of spectral power" que intenta salvar les conegudes limitacions de les "inter-muscular coherence" i "cross-correlations".

Paraules clau: *"Network physiology", "Network physiology of exercise", Coordinació inter-muscular, Treball Neuromuscular Integrat, Sobrecàrrega excèntrica.*

1. INTRODUCCIÓ

1.1 “Network physiology”

Tradicionalment, en l'estudi de la fisiologia humana, es tendeix a concebre el cos des d'una perspectiva vertical, de les estructures cel·lulars fins als òrgans, establint relacions entre estructures una sobre l'altra (Joyner, 2011).

A banda d'aquest model d'estudi vertical, hi ha una aproximació horitzontal, que proposa l'estudi dels òrgans i del seu funcionament a través de les interaccions dinàmiques entre ells. Aquest és un factor clau per a determinar una vinculació entre les relacions orgàniques i la salut. Sorprenentment, hi ha una gran falta de recerca a través d'aquest model horitzontal (Ivanov et al., 1996).

La “network physiology” és un model d'estudi horitzontal, ja que intenta explicar el funcionament dels diferents òrgans de cos i les seves interaccions dinàmiques i el més important, quantificar-les. Aquest aspecte és fonamental ja que a través de l'estudi de les interaccions entre sistemes fisiològics es pot observar com apareixen certes respostes fisiològiques a pertorbacions internes o externes i es pot entendre com els sistemes reaccionen per a generar funcions integrades a nivell de l'organisme (Bartsch et al., 2015; Bashan et al., 2012; D'Agostino, 2014)

Recentment, utilitzant conceptes físics i matemàtics aplicats, s'ha aconseguit extreure informació encapsulada en senyals dels òrgans i dels sistemes fisiològics simples com ara el sistema cardíac, el respiratori, el cervell o l'aparell locomotor.

A més, un cop estudiats, també s'han pogut extreure relacions aparellades entre aquests sistemes, incloent; correlacions creuades entre la pressió arterial i el flux sanguini com a mecanisme per a controlar la vascularització del cervell en diferents condicions fisiològiques (Chen et al., 2006)

Altes estudis pretenen determinar i quantificar el grau d'aparellament entre el sistema cardiovascular i el respiratori durant les diferents fases del son i en diferents grups d'edat. Tot i que hi ha una diferència significativa entre la periodicitat dels ritmes cardíacs i respiratori representats en batecs i respiracions i la gran variabilitat d'aquests, hi ha certs moments en els quals apareix una relació entre aquests ritmes. Aquests

moments en els quals coincideixen els ritmes cardio-respiratoris, són una manifestació de l'organització temporal i l'aparellament entre sistemes degut a una coordinació entre ells a un nivell amagat. Gràcies a un d'aquests estudis, s'ha pogut descobrir que la coordinació cardio-respiratoria, varia més significativament entre les diferents fases del son, que no pas entre rangs d'edat (Bartsch et al., 2012).

En un estudi similar, es quantifiquen les interaccions entre els dos hemisferis cerebrals i entre les seves sub-parts. En aquest estudi es descobreixen moltes variacions i mapes d'interacció entre les diferents parts del cervell humà en les diferents fases del son, que inclouen el nombre de links entre hemisferis i la força d'aquests links (Bartsch et al., 2015).

Totes aquestes troballes i d'altres no esmentades, demostren que hi ha una altra manera d'estudiar el cos i els seus sistemes, a base de les seves interaccions en diferents situacions. Això també pot afectar en el present i en el futur el sector de l'esport i la salut, ja que gràcies als mètodes desenvolupats per la "network physiology", serà possible avaluar l'efecte de certes intervencions d'entrenament sobre el nombre d'interaccions i el grau d'aparellaments entre sistemes del cos humà. Per tal d'arribar a aquest punt, s'hauran d'aplicar nous elements de mesura espai temporals, com ara els electroencefalogrames, l'electromiografia (EMG) o els acceleròmetres, entre d'altres (Balagué et al., 2020).

1.2 "Network Physiology of Exercise"

La "network physiology of exercise" o NPE, de la mateixa manera que la "network physiology", es basa en la integració de l'estudi vertical i l'horitzontal, per tal de descobrir i quantificar, a través dels conceptes matemàtics i físics utilitzats, les interaccions entre sistemes i òrgans en el mateix o diferents nivells .

Tot i que el concepte de "network physiology of exercise" és més recent que la "network physiology", ja s'ha començat a investigar sobre certs temes que afecten directament al sector de les "sport sciences".

En concret, si parlem de la coordinació cardio-respiratoria, sempre s'ha tendit a estudiar variables "gold standard" com ara el VO₂ màxim per tal d'avaluar el grau de forma física aeròbica (Balagué et al., 2020). Tot i això, hi ha una sèrie d'estudis que han començat a

determinar la coordinació entre el sistema cardiovascular i el respiratori a través de varies sèries temporals de variables cardiovasculars i respiratòries (fracció expirada d'oxigen, ventilació, pressió arterial sistòlica i diastòlica i freqüència cardíaca) durant diverses proves estressants del sistema cardiorespiratori (Garcia-Retortillo et al., 2019). Tots aquests estudis, apunten que la coordinació cardiovascular té molta més sensibilitat als canvis que indueix l'exercici que no pas les variables "gold standard" utilitzades normalment per avaluar la forma física aeròbica (Balagué et al., 2016; Garcia-Retortillo et al., 2017) .

A més, hi ha un estudi que ha intentat determinar quin efecte té sotmetre a un esportista a un ambient hipòxic sobre la seva coordinació cardio-respiratoria. S'ha determinat que, augmentar el grau d'aparellament dels dos sistemes en ambients aeròbics intensos o anaeròbics a través de l'entrenament, produeix respostes molt òptimes sobre l'exposició a esforços anaeròbics (Uryumtsev et al., 2020).

Un exemple que l'estudi de variables "gold standard" no sempre ens donarà informació precisa sobre la forma física d'un esportista, torna a ser el cas de l' $\dot{V}O_2$ màx. Si analitzem aquesta variable, ens trobarem que en certs casos aquesta variable haurà augmentat però no ens estarà denotant un augment de forma física de l'esportista, sinó un síndrome de sobre-entrenament, per exemple (Balagué et al., 2020).

Un altre camp que pot explotar amb la metodologia emprada per la "Network physiology of exercise" és el de les lesions musculars esportives. Es podria definir lesió muscular esportiva com a pèrdua de funció o estructura que és objecte d'una examinació clínica, en aquest cas, d'un o varis grups musculars (Timpka et al., 2014). Certs estudis determinen que la possibilitat de patir una lesió muscular per sobreús recau sobre la connectivitat entre altres micro-lesions ja patides i la reestructuració en la coordinació motriu que aquestes provoquen. En aquest cas, connectivitat no només fa referència a la connexió entre petites lesions que en produeixen d'altres, sinó que també es relaciona a una variable de coordinació entre teixits sans del sistema múscul-esquelètic (Pol et al., 2019).

Tot i que varies micro-lesions poden portar a una lesió més gran, si aquestes no tenen un grau de connectivitat elevat, el sistema múscul-esquelètic pot mantenir la seva funció gràcies a certes sinèrgies musculars compensatòries (Pol et al., 2019).

Dit això, és necessari trobar les eines per tal de quantificar les interaccions entre estructures del sistema múscul-esquelètic i entre aquestes estructures i altres sistemes fisiològics per tal d'anticipar possibles lesions musculars (Balagué et al., 2020).

Si es té en compte tot el descrit anteriorment i es pretén avançar en les “sport sciences” gràcies a la “network physiology of exercise”, es poden començar a despendre nous paradigmes d'estudi com per exemple com diferents grups musculars coordinen la seva activació per tal de realitzar una tasca motriu amb èxit tot i aparèixer fatiga.

1.3 Connexió múscul - sistema nerviós

1.3.1 El múscul

El múscul esquelètic contribueix significativament en moltes funcions vitals, com ara; generar força o potència, mantenir la postura erecta i produir moviment per tal de poder participar de la vida social i de l'activitat que sigui. Ho aconsegueix gràcies a la transformació de l'energia química a energia mecànica. Està influenciat per varis factors com poden ser l'estructura i l'arquitectura del mateix, el tipus de fibra, l'equilibri excitació contracció i l'alliberació d'energia per tal de generar força, potència i en general, moviment.

A més, el múscul intervé en processos metabòlics que ajuden a mantenir un metabolisme energètic basal adequat per a l'organisme (Frontera & Ochala, 2015).

1.3.2 Les fibres musculars

Les fibres musculars estan bàsicament formades per proteïna, en aproximadament un 80% de la seva totalitat. Aquestes proteïnes poden ser de tipus estructurals, contràctils o regulatòries (Hoppeler et al., 1973).

Aquestes fibres contenen miofibril·les i miofilaments que s'enllacen i es creuen entre ells per tal de crear el sarcòmer, que és la unitat contràctil funcional del múscul. En el sarcòmer, les dues proteïnes més abundants són l'actina i la miosina, que respectivament, formen els filaments primis i els gruixuts (Gelfi et al., 2011). La contracció muscular es generarà en els ponts creuats que formen aquests dos filaments, amb l'ajuda d'altres proteïnes, ions, metabòlits i estímuls (Frontera & Ochala, 2015).

Existeixen diferents tipus de fibres musculars, classificades en fibres de tipus I o lentes, fibres de tipus IIa o ràpides i fibres de tipus IIx o especialitzades (Heckman & Enoka, 2012). A part d'aquesta classificació, també es poden diferenciar els tipus de fibra

muscular en base a certs ítems, com ara; color (en funció del contingut en mioglobina), propietats contràctils en resposta a una estimulació elèctrica, velocitat de contracció, grau de fatiga durant una activació sostinguda o predominança de certs patrons d'obtenció d'energia, metabòlics o enzimàtics, entre d'altres (Lamboley et al., 2014).

1.3.3 La unitat motora

La unitat motora és un transductor neuromecànic que, estant en contacte amb el múscul a través de la placa motora, converteix les eferències nervioses descendents en energia mecànica per tal de generar moviment. Consta de dues parts; la motoneurona i les fibres musculars les quals innerven els seus axons, també anomenada unitat muscular o placa motora. Aquestes dues parts, tot i estar diferenciades, actuen com a una sola entitat, que representa l'estructura elemental pel control del moviment (Heckman & Enoka, 2012).

La unitat motora està conformada per motoneurons centrals o motoneurons alfa, que estan situades molt a prop de la banya medial de la medul·la espinal (Heckman & Enoka, 2012) i per motoneurons perifèriques o motoneurons gamma, que innerven un múscul en concret, les quals es disposen longitudinalment al llarg del múscul i creen el que s'anomena fus neuromuscular (Burke et al., 1977).

De la mateixa manera que es classifiquen les fibres musculars, les unitats motores també es poden classificar. Aquesta diferenciació es realitza a través de l'anàlisi de la pèrdua de força quan la motoneurona és sotmesa a un protocol d'estimulació elèctrica. Podem diferenciar les motoneurons en tipus S (o de lenta pèrdua de força) o de tipus F (o de ràpida pèrdua de força). Aquestes es poden sub-classificar en FF (o ràpides en obtenir fatiga) o FR (resistents a la fatiga) (Burke et al., 1973). Tot i això, degut a certs factors en l'aplicació del mètode, la classificació no es pot considerar com a totalment fiable.

1.3.4 Sistema neuromuscular

El sistema neuromuscular és un sistema de control complex que integra components supraespinals, sensorials i musculars (Röhrle et al., 2019).

El bloc supraespinal, conformat per el còrtex motor, el cerebel i els ganglis basals, és el responsable de generar moviment voluntari a través d'un desig o a través dels patrons dels moviments automatitzats (Krakauer & Ghez, 2000).

Els components sensorials, es nodreixen dels reflexes musculars, que informen sobre l'estirament o la rapidesa de contracció de l'estructura muscular i de la informació tàctil

per tal d'informar al bloc supraespinal sobre la posició del cos en l'espai i permetre que aquest pugui rectificar certs moviments. Els receptors més importants a nivell muscular i tendinós són el fus neuromuscular i els òrgans tendinosos de Golgi (Röhrle et al., 2019). Finalment, el component muscular del sistema neuromuscular, consta de la unitat múscul tendó, que és la responsable d'executar el moviment del cos a través de contraccions regides pels estímuls del bloc supraespinal (Röhrle et al., 2019).

Per tant, el sistema neuromuscular es podria definir com a un sistema complex i adaptatiu el qual està influenciat per l'estat biofísic de l'individu (bloc supraespinal, components sensorials i musculars) i per l'ambient en el que aquest es troba.

Els components d'aquest sistema neuromuscular estan connectats físicament. El bloc supraespinal envia la informació al múscul a través de les motoneurons i els seus axons, que units a la fibra muscular, formen la placa motora.

1.3.5 Fisiologia del sistema neuromuscular en el control del moviment

Tal i com s'ha apuntat en apartats anteriors, el bloc supraespinal, amb l'ajuda també del bloc espinal, controlen el moviment voluntari (Krakauer & Ghez, 2000). Ho fan gràcies a les motoneurons alfa, que es disposen a la banya anterior de la medul·la i despleguen els seus axons fins a innervar les fibres musculars a través de la placa motora. Aquestes motoneurons, a part de transmetre la informació provinent del sistema nerviós central, també processen les aferències que provenen dels receptors sensorials del múscul agonista i dels músculs antagonistes.

Tot i això, les motoneurons alfa no són les úniques que innerven les fibres musculars. També existeixen les anomenades motoneurons gamma. La funció d'aquestes motoneurons és informar al múscul a través de feedback (processat i executat per les motoneurons alfa) sobre la tensió de les fibres musculars que es troben dins el seu camp d'influència, dins del fus neuromuscular. Explícitament, les motoneurons gamma informen sobre els estiraments ràpids o dinàmics i lents o estàtics de les fibres musculars (Taylor et al., 2000).

Es pot parlar d'un tercer grup de motoneurons, les beta. Aquestes, no només innerven fibres musculars pertinents al fus neuromuscular, sinó que també innerven fibres extrafusals, amb la missió d'informar al sistema nerviós central sobre la velocitat de contracció de les fibres lentes (Tipus I) i de les fibres ràpides (Tipus IIa o IIx) (Boyd et al., 1977)

Finalment, cal destacar la funció dels receptors musculars i tendinosos més importants, els del fus neuromuscular i els òrgans tendinosos de Golgi. Aquests, traslladen la informació de tensió i estirament del múscul i tendó directament al sistema nerviós central per tal que aquest pugui modificar la informació de moviment que enviarà a la motoneurona alfa (Röhrle et al., 2019).

1.4 Coordinació inter-muscular

Un cop s'entén com es regula el moviment, cal saber que el moviment en una articulació, no només és produït per un múscul, sinó que aquest és aconseguit gràcies a la sinèrgia i a la connexió entre agonistes i antagonistes. El moment de força final d'una articulació és el resultat entre la associació neuromuscular de varis grups musculars, on el control del bloc supraespinal és fonamental. Tot i això, no només els elements centrals regulen aquesta sinèrgia, sinó que també els receptors del múscul i del tendó, envien informació del propi múscul al sistema nerviós central i als seus sinergistes per tal que aquests regulin la seva participació en el moviment, reduint-la o augmentant-la en funció de la situació (Röhrle et al., 2019).

1.4.1 Mètodes de mesura de coordinació inter-muscular

Existeixen varis mètodes per tal de mesurar la coordinació entre músculs, un dels més destacats són les "cross-correlations" de les senyals electromiogràfiques dels músculs a estudiar. Sovint, aquestes correlacions s'estudien des d'un domini temporal, que intenta relacionar dues senyals en funció del temps. Tot i això, hi ha altres maneres d'estudiar les correlacions, per exemple a través de l'anomenada "coherence". Aquest mètode, prova de relacionar les senyals electromiogràfiques a través d'un domini freqüencial (Farmer et al., 1993).

La diferència bàsica entre un domini temporal i un de freqüencial, és que el temporal mostra com una senyal varia al llarg del temps mentre que el freqüencial mostra quina quantitat de senyal cau dins de cada banda de freqüències.

En l'estudi de la coordinació inter-muscular, el domini temporal informa sobre l'associació temporal entre motoneurons com també de la força d'aquestes associacions. Per contra, el domini freqüencial o l'estudi de la "inter-muscular coherence", informa sobre el contingut freqüencial comú entre les motoneurons dels músculs estudiats.

Això pot ser útil per estudiar la coordinació entre diferents grups musculars a l'hora de realitzar certes tasques específiques, ja que una associació temporal no implica sinèrgia entre músculs, sinó que només explica una coordinació temporal en les descàrregues de les motoneurons (Person & Mishin, 1964).

Hi ha estudis que han intentat relacionar cada banda de freqüències amb l'activació muscular. Sembla ser que la banda alfa (8-12Hz), amagaria informació envers les activacions isomètriques, mentre que les bandes beta (15-30Hz) i gamma (30-60Hz) amagarien informació sobre activacions isomètriques voluntàries sub-màximes, ja que quan es realitza una activació isomètrica sub-màxima de dos músculs teòricament sinèrgics, la "coherence" entre aquestes bandes de freqüències augmenta (Conway et al., 1995; Kattla & Lowery, 2010).

Tot i això, la literatura científica també ha intentat demostrar quina banda de freqüència en EMG amagaria informació sobre activacions dinàmiques. Això és de gran importància ja que, normalment les lesions solen ocórrer degut a un gran nombre d'aquestes activacions dinàmiques (Morelli et al., 2018).

En l'estudi de Chang et al., 2012, es pretenia estudiar els canvis en la "cross-correlation" i en la "coherence" dels músculs extensors de genoll en fatiga. Es va sotmetre als participants a unes sèries d'exercicis d'"step" fins que aquests arribessin a la fatiga i es va poder observar que tant en l'aparellament del recte femoral amb el vast medial com el del vast medial amb el vast lateral, van augmentar els valors de "cross-correlation" respecte el repòs. Això va suggerir que les unitats motores d'aquests músculs van reduir els retards de temps d'activació entre elles per tal de generar una activació més simultània en el temps. També es va poder observar que la "coherence" en les bandes de freqüència beta entre els músculs recte femoral i vast medial i els recte femoral i vast lateral, va augmentar durant les fases de pujada i baixada de l'exercici.

Això pot portar a pensar que, quan els músculs entren en fatiga com a causa d'un exercici amb activacions dinàmiques, aquests augmenten la seva "cross-correlation" i la seva "coherence" com a mecanisme de compensació per tal de retardar l'aparició fallades neuromusculars i mantenir la coordinació muscular per evitar lesions (Enoka, 1996; Pol et al., 2019).

Malgrat tot l'exposat anteriorment, sembla ser que les bandes de freqüència amagarien més informació sobre el tipus de fibra al que responen i no tant al tipus d'activació

muscular que realitzen. Segons la literatura, les freqüències més baixes (40-60Hz) respondrien a les motoneurons més petites vinculades a fibres de tipus I, les freqüències mitges, (60-120Hz) respondrien a motoneurons de mida mitja relacionades a fibres tipus IIa i les freqüències més altes (170-220Hz) a les motoneurons més grans vinculades a les fibres tipus IIx (Rosenblum et al., 2021). D'aquesta manera, l'EMG ens permet fer una biòpsia no invasiva força precisa durant la realització d'un exercici.

1.5 Limitacions de la “inter-muscular coherence”

Tot i això, la “inter-muscular coherence” té unes limitacions conegudes pel que fa a la mesura de la coordinació inter-muscular. La primera és que és considerada una mesura estàtica, això vol dir que només permet mesurar el contingut freqüencial d'una finestra temporal d'un múscul amb el contingut freqüencial de la mateixa finestra temporal d'un altre múscul, per tant, el que estem analitzant, és un moment concret en el temps, no un continu temporal, que és el que ens pot interessar si el que analitzem és un exercici concret.

A part, només permet comparar dues bandes de freqüència idèntiques entre dos músculs diferents. Si entenem que cada banda de freqüència correspon a un tipus de fibres diferents, aquesta limitació afecta en la comprensió de com aquestes s'aparellen, ja que no podem veure si les fibres varien el seu aparellament en funció de les demandes de la tasca o de la fatiga de la persona.

1.6 Metodologies d'entrenament i coordinació inter-muscular

A dia d'avui, hi ha moltes metodologies d'entrenament que pretenen reduir el risc de patir lesions i/o millorar el rendiment dels esportistes en les seves disciplines.

El tipus d'entrenament més fonamental, és l'entrenament de força. Segons la ciència, per tal d'obtenir el màxim nivell de força muscular possible, cal reclutar el màxim nombre d'unitats motores en un moment determinat del temps, és a dir, ha d'existir una coordinació en el reclutament de les unitats motores d'un grup muscular (Schoenfeld et al., 2017). Per tant, es pot dir que els augments en la força muscular vindran donats en part per les adaptacions neurals perifèriques que l'entrenament de força produeixi (Del Vecchio et al., 2019), com ara podrien ser la freqüència de descàrrega d'una unitat motora o la mateixa sincronització entre unitats motores d'un grup muscular (Folland & Williams, 2007).

Un mètode d'entrenament que ha demostrat generar millores significatives a nivell muscular i neural és l'entrenament de força amb sobrecàrrega excèntrica (sEXC). L'entrenament de força tradicional comprèn ambdues fases del moviment, la concèntrica i l'excèntrica, apareixent aquesta última quan les forces externes són superiors a les que el múscul pot generar, provocant així una contracció en estirament (Lindstedt et al., 2010). Tot i això, degut a que la quantitat d'estrès que es genera en la fase excèntrica depèn de la fase concèntrica, normalment aquest no és suficient per a estimular-la correctament (Douglas et al., 2017).

Molts estudis han demostrat que l'entrenament sEXC produeix millores més grans que l'entrenament concèntric o tradicional en; potència i cicle d'estirament escurçament muscular (CEE), suposadament degut a una major coordinació inter-muscular (Duchateau et al., 2006), força muscular, segurament degut a una major sincronització entre unitats motores o l'augment de la freqüència de descàrrega d'aquestes unitats motores (Folland & Williams, 2007), "rate of force development", degut a una combinació d'aspectes musculars i neurals, sobretot relacionats amb el control del bloc supraespinal sobre la contracció muscular i la inhibició dels reflexes perifèrics (Oliveira et al., 2016) i altres variables, sobretot morfològiques i estructurals a nivell muscular.

Una altra metodologia d'entrenament que té com a objectiu reduir el nombre de lesions sobre els esportistes és el treball neuromuscular integrat (TNI). Aquest mètode d'entrenament pretén augmentar el rendiment i evitar lesions degudes a l'acumulació de dèficits neuromusculars (Sañudo et al., 2019).

Comprèn 6 components essencials que aporten variabilitat d'estímuls. Tal i com va descriure Fort-Vanmeerhaeghe et al., 2016, els components del TNI són; coordinació, força, pliometria, agilitat, equilibri dinàmic, velocitat i entrenament de la força resistència.

Pel que fa a coordinació, s'entén que el treball es realitza a través de les habilitats motrius bàsiques (HMB), sobretot les de locomoció i manipulació, tot i que també n'hi ha que tracten l'equilibri dinàmic. Aquestes HMB ajuden als esportistes en el control de certs patrons específics dels esports i a més generen un descens de la incidència lesiva durant la pràctica esportiva (Fort-Vanmeerhaeghe et al., 2016b).

Pel que fa a la força, els autors detallen exercicis de "CORE" i també exercicis de pressions i traccions de membres de les extremitats superiors (EESS) i les extremitats

inferiors (EEII). A més, dins dels components del TNI, també hi ha una altra manifestació de la força, anomenada força resistència, la qual els autors descriuen com al treball d'habilitats motrius realitzades sota fatiga. Tant la força com la força resistència són components que han estat identificats per la ciència com a rellevants en el control neuromuscular en esportistes (Brazen et al., 2010; Hewett et al., 2015). Un dels components del TNI que rep més importància és l'equilibri dinàmic, entès com l'entrenament de l'equilibri durant la realització d'accions dinàmiques com les HMB. Varis estudis han determinat millores en el control neuromuscular, degut a la millor interpretació dels reflexes articulars per part del sistema sensoriomotriu (Fort-Vanmeerhaeghe et al., 2016a; Zech et al., 2010). Dos dels factors del TNI importants també en la prevenció de lesions, són la pliometria (desenvolupament d'habilitats en el CEE) i l'agilitat (desenvolupament d'habilitats motrius sobretot de desplaçament, a gran velocitat incorporant canvis de direcció) (Fort-Vanmeerhaeghe et al., 2016b). Aquestes dues habilitats, integren components de control neuromuscular, sobretot reflexes musculars com ara el reflex miotàtic, que convertirà la senyal d'estirament bruscat del fus neuromuscular en una contracció ràpida d'aquest mateix múscul, evitant així un estirament massa elevat que pugui produir lesions musculars (Lloyd et al., 2011). Finalment, la velocitat és descrit com al component més determinant a l'hora de preveure el rendiment dels esportistes durant les etapes més formatives, ja que si un esportista no és capaç d'accelerar el seu cos en línia recta a grans velocitats, s'estima que no serà capaç de desplegar el rendiment necessari per a competir en condicions (Sañudo et al., 2019).

1.7 Buit de coneixement

Si parlem de la coordinació inter-muscular, hi ha pocs estudis que intentin descriure l'eficàcia de diferents mètodes d'entrenament en la millora d'aquesta variable a través de la "inter-muscular coherence", per tant, la majoria de referències que apunten tenir-hi efecte, ho fan des de l'anàlisi dels possibles elements del control neuromuscular que poden veure's afectats per les seves intervencions.

Tant l'entrenament sEXC com el TNI, detallen millores en el control neuromuscular, però no poden quantificar els efectes que tenen sobre la coordinació inter-muscular. L'entrenament sEXC té una gran quantitat de literatura científica al seu darrere, estudiant varies formes d'aplicació i diferents rangs d'edat o d'especialització esportiva.

El TNI, també té ciència darrera, però ha estat basat pràcticament en la seva totalitat en els efectes que indueix sobre nens o adolescents, per tant, a l'hora de comparar-los en grups d'edat d'adults o adults joves, hi ha una limitació pel que fa a la ciència en aquests grups d'edat.

Existeixen molts tipus de mètodes de valoració de les interaccions corporals. Un dels més utilitzats és la "inter-muscular coherence". Aquest concepte ha estat utilitzat per a determinar aparellaments entre diferents òrgans i sistemes corporals en diferents situacions. Tot i això, dins del camp de la NPE, ha estat introduït recentment i els estudis que han pogut extreure conclusions gràcies a aquest mètode no són molts.

A banda que hi ha poca ciència en la mesura de la coordinació inter-muscular a través de la "coherence", aquest mètode té unes limitacions ja presentades anteriorment. És per aquest motiu que en el present estudi es proposa un mètode que permetrà salvar-les a través d'un anàlisi dinàmic (prenent sèries temporals llargues) i específic (aparellant diferents bandes freqüencials de diferents grups musculars sinèrgistes).

2 HIPÒTESI I OBJECTIUS

2.1 Hipòtesi

El TNI generarà millores més significatives en la coordinació inter-muscular que el treball sEXC en adults joves sans.

2.2 Objectius

- Comparar l'eficiència del TNI versus l'entrenament sEXC per a generar millores en la coordinació inter-muscular en adults joves sans.

3 METODOLOGIA

3.1 Participants

3.1.1 Criteris d'inclusió i d'exclusió

Criteris d'inclusió	Criteris d'exclusió
<ul style="list-style-type: none">Homes i dones entre 18 i 30 anys.Estar estudiant a l'EUSES, un grau universitari o un cicle formatiu de grau mig o superior.	<ul style="list-style-type: none">Presentar símptomes de Sars-CoVid-19 o estar en aïllament domiciliari per contacte estret amb una persona positiva.Estar en fase de recuperació d'una lesió (Fernandez-Gonzalo et al., 2014).Persones amb medicació per malalties cròniques (Miller et al., 2006).Haver realitzat entrenament de força en els darrers 6 mesos de manera regular (Maroto-Izquierdo et al., 2019).Prendre suplementos nutricionals que puguin afectar al seu rendiment o concentracions metabòliques (Miller et al., 2006).

Taula 1: Criteris d'inclusió i exclusió de l'estudi.

3.1.2 Detall de la mostra

Els participants de l'estudi seran estudiants de l'Escola Universitària de la Salut i l'Esport de Salt (EUSES), d'entre 18 i 30 anys, estiguin cursant un o dos graus universitaris o cicles formatius de grau mig o superior, complint els criteris d'inclusió i exclusió detallats en el disseny de l'estudi.

3.1.3 Tamany de la mostra i tècnica de mostreig

La mida de la mostra la determinarà el nombre final d'inscrits al qüestionari de participació en l'estudi, que s'introduirà a la pàgina web de la universitat, a cartells informatius pel centre i en classes dels graus i cicles a partir del dia 07/03/2020. El límit total serà de 50 persones, sense tenir en compte el sexe, sempre i quan es compleixin els criteris d'inclusió i exclusió.

La tècnica de mostreig seleccionada serà una tècnica probabilística aleatòria sistemàtica. El nombre total de persones inscrites al qüestionari es dividirà per la mostra màxima (n=50). D'aquesta operació en sortirà una constant. Un cop es tingui la constant, es començarà a elegir als participants des d'una llista numerada. El/la primer/a participant, sortirà de la tira aleatòria d'un valor entre 1 i la constant i a partir d'aquest número, els següents seran els que corresponguin als valors de la llista que acabin en el

número de la constant. Per exemple, si la constant és 5 i el valor escollit aleatòriament és el 3, els següents escollits seran: 13, 23, 33... La data límit per a tenir la mostra complerta serà el dia 01/04/2022.

3.1.4 Selecció i formació d'avaluadors i aplicadors

Els/les elegibles per a la tasca d'avaluadors o aplicadors, seran els estudiants de 3r del grau en Ciències de l'Activitat Física i Esport (CAFE) d'EUSES que en el moment de començar la intervenció començaran el seu últim curs del grau. S'oferirà als alumnes fer d'avaluadors i/o d'aplicadors en el projecte d'intervenció mitjançant qüestionaris i càpsules informatives sobre el projecte. Els estudiants escollits rebran un contracte de pràctiques extra-curriculars per a computar les hores invertides en el projecte al seu expedient acadèmic. El nombre d'estudiants màxims per a participar en l'estudi serà de 7 estudiants. Si hi ha un excés de participants per a realitzar aquestes tasques, la tria es realitzarà per nota d'expedient acadèmic. La data d'inici i límit de registre per part de l'estudiant seran el dia 14/03/2022 i el dia 04/04/2022 respectivament i el dia límit per a tenir els 7 estudiants elegits serà el dia 08/04/2022, dia on es comunicarà als estudiants a través de correu electrònic que han estat elegits.

Un cop s'hagin elegit els 7 estudiants encarregats d'avaluar i aplicar els protocols d'entrenament, es faran 3 sessions en 3 dies diferents durant els següents mesos. Es realitzaran les formacions sobre el protocol d'avaluació, les intervencions i el disseny d'estudi els dies 02/09/2022, 09/09/2022 i 16/09/2022.

3.1.5 Comitè d'ètica

La investigació s'iniciarà quan el Comitè d'Ètica d'investigació Clínica (CEIC) de l'hospital universitari Doctor Josep Trueta accepti les condicions de l'estudi. S'hauran de garantir tres aspectes:

- Les recomanacions contingudes a la Declaració de Helsinki i revisions posteriors com l'informe Belmont, el Conveni d'Oviedo, els aspectes ètics i metodològics de les Bones Pràctiques Clíniques de la Unió Europea, així com altres guies per la metodologia de la Investigació de la OMS.
- La legislació vigent que regula la investigació: RD nº 223/2004 de 6 de febrer de 2004, l'Ordre Autonòmica 406/2006 de 24 d'octubre i la Llei d'Investigació Biomèdica 14/2007, de 3 de juliol.

- La confidencialitat de la Informació en referència a la identitat de subjectes que participen, la Llei Orgànica de Protecció de Dades 15/1999. S'informarà als participants de l'estudi sobre les seves característiques i es demanarà que firmin un consentiment informat.

3.2 Intervenció

3.2.1 Variables d'estudi

En aquest estudi apareixen en joc tres variables principals, dues d'independents i una de dependent.

- Variable dependent: Coordinació inter-muscular de la musculatura extensora de genoll.
- Variables independents: Intervenció TNI i intervenció de treball EXC.

3.2.2 Instrumentes d'avaluació

- Test d'"step" fins a nivells de fatiga alts (BORG 17 en escala del 6 al 20) avaluats amb EMG (Chang et al., 2012): El test constarà de varies sèries d'"step" fins a nivells de fatiga alts. Els participants hauran de pujar a un escaló de 25 cm d'altura continuadament a una cadència de 5 cicles per cada 10 segons. Es descriu un cicle com a pujar i baixar amb els dos peus de l'"step". S'avaluaran les dues cames dels participants, sempre deixant 7 minuts entre una cama i la contra-lateral per a evitar els efectes de la fatiga. Els músculs dels quals s'estudiarà la coordinació inter-muscular són; múscul vast medial del quàdriceps, vast lateral del quàdriceps i recte femoral. El test acabarà quan els participants descriguin un BORG 17.

S'utilitzarà un aparell d'EMG de la marca Biopac Systems, concretament el model Biopac MP36 (Garcia-Retortillo et al., 2020). S'utilitzarà l'aparell d'EMG amb elèctrodes circulars d'1 cm de diàmetre, de material Ag/AgCl i en configuració bipolar. Els participants de l'estudi hauran d'assistir a la valoració amb roba apte per a la col·locació dels elèctrodes. Previ a la subjecció dels elèctrodes a la pell dels participants, es prepararà el teixit rasurant la superfície, netejant-la amb alcohol i deixant-la assecar durant 1 minut tal i com marquen les recomanacions del SENIAM per tal de reduir la impedància del teixit envers les senyals electromiogràfiques (Hermens et al., 2000).

S'estudiaran 3 grups musculars; el vast lateral del quàdriceps (VL), el vast medial del quàdriceps (VM) i el recte femoral del quàdriceps (RF). La col·locació dels elèctrodes vindrà donada per les recomanacions del SENIAM. En el cas del VL, els elèctrodes es col·locaran a 2/3 en la línia des de l'espina ilíaca antero-superior (EIAS) fins el pol lateral de la ròtula. En el cas del RF, els elèctrodes es col·locaran a ½ en la línia des de la EIAS fins al pol superior de la ròtula. Finalment, en el cas del VM, els elèctrodes es col·locaran al 80% de la línia entre la EIAS i la frontera anterior de l'origen del lligament colateral medial del genoll (Hermens et al., 2000).

3.2.3 Protocol d'avaluació

El protocol d'avaluació de la coordinació inter-muscular pre-intervenció, es realitzarà el dia 17/09/2022 i el dia 24/09/2022 en una franja horària de 5 hores entre les 9h del matí i les 14h de la tarda. Cada dia passaran per l'avaluació 25 participants, per tant cada hora s'avaluarà a 5 persones diferents.

Abans de la realització de l'avaluació, els participants disposaran d'1 dia de familiarització amb el test, que es realitzarà el dia 10/09/2022. Aquesta familiarització constarà d'1 intent del test per participant sense ser avaluat.

Les avaluacions i la familiarització es duran a terme a EUSES, en una aula habilitada per a la mesura de la variable d'estudi i amb les condicions necessàries per a complir les recomanacions degudes en contra del contagi per Sars CoVid-19.

En aquest protocol d'avaluació s'utilitzarà el test d'"step" fins a nivells de fatiga alts avaluat amb EMG tal i com s'ha explicat anteriorment.

El protocol d'avaluació serà exactament el mateix per a l'avaluació post-intervenció, que serà el dia 10/12/2022 i per l'avaluació 6 setmanes post-intervenció que es realitzarà el dia 20/01/2023.

3.2.4 Protocols d'intervenció

Prèviament a l'inici de l'aplicació dels protocols del grup TNI i sEXC, els participants realitzaran tres sessions de familiarització dels exercicis dels seus respectius protocols per tal d'evitar perdre temps en aprendre'ls durant les sessions d'entrenament, aquestes sessions de familiarització es realitzaran durant la setmana del 03/10/2022. Els protocols d'intervenció començaran el dia 10/10/2022 i duraran 8 setmanes, fins al dia 02/12/2022.

3.2.4.1 Protocol del grup TNI

El protocol del grup TNI durarà 8 setmanes, a raó de 3 sessions per setmana, amb 5 exercicis per cada 2 setmanes. Cada exercici busca crear adaptacions sobre un element diferent del TNI (pliometria, força, equilibri dinàmic, CORE i coordinació més agilitat), tots descrits com a essencials per a una correcta coordinació inter-muscular (Fort-Vanmeerhaeghe et al., 2016b).

Cada dues setmanes es progressarà i es complexificarà l'exercici de base que ja s'haurà entrenat durant aquestes setmanes.

3.2.4.2 Protocol del grup sEXC

El protocol del grup sEXC també durarà 8 setmanes, a raó de 3 sessions per setmana, amb 4 exercicis de base realitzats en una màquina iso-inercial "Eccopower Training Force® – SQUAT". Tots els exercicis parteixen d'una càrrega de 3 sèries de 8 repeticions a un 70% d'1 repetició excèntrica màxima. Cada setmana s'incrementarà en 2 el número de repeticions de cada sèrie, fins a arribar com a màxim a les 12 repeticions totals per sèrie. Un cop s'hi hagi arribat, es tornarà a les 8 repeticions inicials, però augmentant un 5% el % d'1 repetició excèntrica màxima.

3.2.4.3 Consideracions de les intervencions

Per tal d'assegurar un volum equiparat entre les intervencions TNI i sEXC, es procurarà igualar les càrregues d'entrenament entre les dues intervencions. En aquest cas a través de la quantificació del nombre de sèries per sessió. Es procurarà que hi hagi un total de 12 sèries per sessió entre tots els exercicis de cada protocol. La intenció és reduir al màxim el biaix de resultats entre les intervencions per tal de poder mesurar els efectes de les intervencions sobre la coordinació inter-muscular de la manera més objectiva possible.

Intervenció TNI (Fort-Vanmeerhaeghe et al., 2016b)

CONTINGUT TNI	SETMANES 1 I 2	SETMANES 3 I 4	SETMANES 5 I 6	SETMANES 7 I 8	VOLUM/SESSIÓ	INTENSITAT
Pliometria	Squat jump (3S x 6R)	Lunge jump (3S x 6R per cama)	Single-leg hop (3S x 3R, cada R són 3 salts)	Single-leg crossover hop (3S x 3R, cada R són 3 salts)	Marcades per exercici	Màxima
Força	Lunge	Squat	Lateral lunge	Split squat	2 sèries de 10 repeticions	70% d'1 repetició màxima
Equilibri dinàmic	Squat plataforma inestable	Lunge plataforma inestable	Squat canvi recolzament inestable	Lunge canvi recolzament inestable	2 sèries de 6 repeticions	Pes corporal, velocitat mitja.
CORE	Planxa frontal	Planxa lateral	Equilibri genolls plataforma inestable	Equilibri genolls sobre pilota fitball	2 sèries de 15 segons	Màxima
Coordinació + Agilitat	Skipping amb desplaçament frontal 15 metres + gir 360º	Skipping amb desplaçament posterior 15 metres + gir 180º	Skipping amb desplaçament frontal 15 metres + gir 360º + canvi de direcció 45º amb velocitat de reacció	Skipping amb desplaçament posterior 15 metres + gir 180º + canvi de direcció 45º amb velocitat de reacció	3 sèries de 4 repeticions	Màxima

Taula 2: Intervenció TNI

Intervenció EXC (Douglas et al., 2017)

EXERCICI	VOLUM/SESSIÓ	CRITERIS D'AUGMENT DE CÀRREGA	INTENSITAT
Squat	3S x 8R	Cada setmana s'augmenten 2 repeticions, fins a les 12. Quan s'ha arribat a les 12 repeticions es torna a les 8 inicials, augmentant un 5% el % d'1 repetició màxima excèntrica.	70% d'1 repetició màxima excèntrica i fins al 80% d'1 repetició màxima excèntrica
Lunge	3S x 8R	Cada setmana s'augmenten 2 repeticions, fins a les 12. Quan s'ha arribat a les 12 repeticions es torna a les 8 inicials, augmentant un 5% el % d'1 repetició màxima excèntrica.	70% d'1 repetició màxima excèntrica i fins al 80% d'1 repetició màxima excèntrica
Split squat	3S x 8R (per cada cama)	Cada setmana s'augmenten 2 repeticions, fins a les 12. Quan s'ha arribat a les 12 repeticions es torna a les 8 inicials, augmentant un 5% el % d'1 repetició màxima excèntrica.	70% d'1 repetició màxima excèntrica i fins al 80% d'1 repetició màxima excèntrica
Lunge lateral	3S X 8R (per cada lateral)	Cada setmana s'augmenten 2 repeticions, fins a les 12. Quan s'ha arribat a les 12 repeticions es torna a les 8 inicials, augmentant un 5% el % d'1 repetició màxima excèntrica.	70% d'1 repetició màxima excèntrica i fins al 80% d'1 repetició màxima excèntrica

Taula 3: Intervenció sEXC

Calendari setmanal dels grups estudi i control

DIA/GRUP	Dilluns	Dimarts	Dimecres	Dijous	Divendres	Dissabte	Diumenge
Grup TNI	Protocol TNI	Descans	Protocol TNI	Descans	Protocol TNI	Descans	Descans
Grup EXC	Protocol sEXC	Descans	Protocol sEXC	Descans	Protocol sEXC	Descans	Descans

Taula 4: Calendari setmanal de les intervencions

3.3 Anàlisi de dades

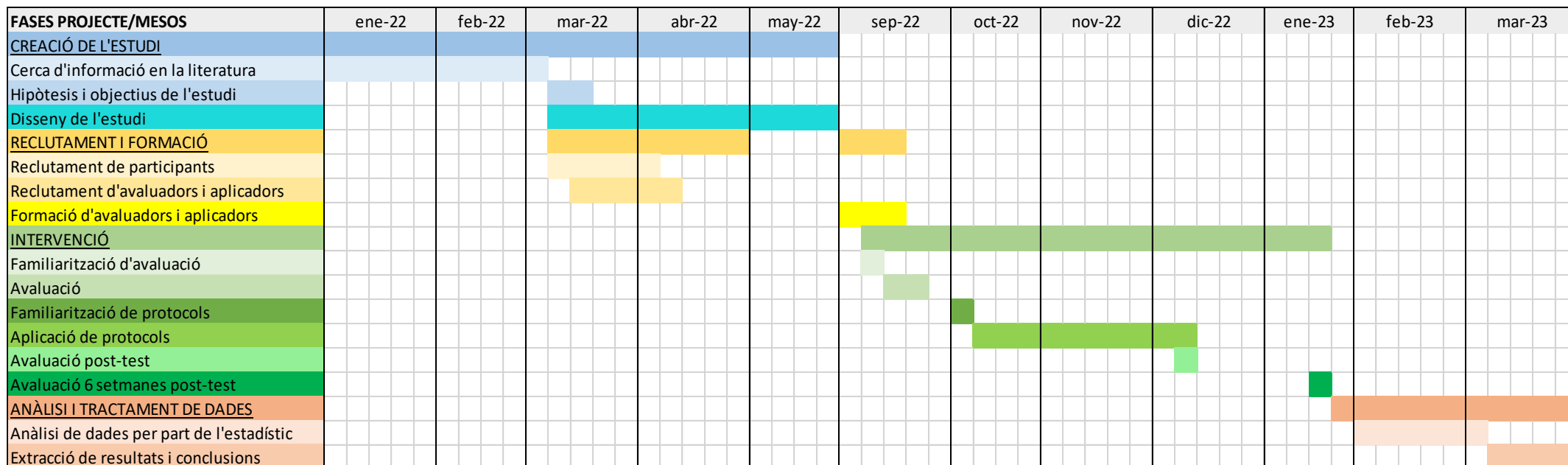
Per tal de determinar la coordinació inter-muscular entre els grups musculars descrits, s'utilitzarà un mètode de "cross-correlations of spectral power" sobre sèries temporals tant llargues com el test d'step i corresponent a cada una de les següents bandes de freqüència; 5-25Hz, 25-45Hz, 45-65Hz, 65-85Hz, 85-105Hz, 105-125Hz, 125-145Hz, 145-165Hz, 165-185Hz, 185-205Hz, 205-225Hz i 225-250Hz.

Cada una de les sèries temporals obtingudes del test d'"step", s'aparellarà a través de les "cross-correlations" amb les demés sèries obtingudes d'altres grups musculars. A partir d'aquests aparellaments, es podrà analitzar com les fibres interactuen i varien les seves estratègies d'aparellament al llarg de tot l'exercici i la fatiga que aquest indueixi a l'organisme.

A part, les bandes aparellades no seran sempre les de la mateixa freqüència, sinó que també s'analitzaran les sèries temporals d'unes bandes de freqüència amb d'altres completament diferents per tal d'analitzar com un tipus de fibra es relaciona amb un tipus de fibra diferent per tal de garantir en tot moment un correcte funcionament muscular.

Les dades recollides seran analitzades per l'estadístic a partir del mes de febrer del 2023. S'esperarà tenir les dades analitzades en un total d'1 mes per tal de poder extreure conclusions a partir de març del 2023.

3.4 Cronograma



Imatge 1: Cronograma

3.5 Pressupost

Es calcularà el pressupost de l'estudi en base al material i recursos no disponibles. Els recursos ja disponibles per a la realització de la investigació són:

- 10 fitballs
- Discos de pes
- 25 màrfegues d'exercici
- 2 BOSU
- 20 cons plans
- 1 "Eccopower Training Force® – SQUAT" amb complements.
- Tamboret 25 cm

El pressupost en base als recursos no disponibles o necessaris es detallen en la següent taula:

Recursos humans	
Sou de l'investigador principal (39setm x 15h x 12€)	7020€
Sou de l'estadístic (8setm x 10h x 15€)	1200€
Sou dels alumnes de pràctiques (21setm x 7h x 5€)	735€
Subtotal	8955€
Recursos materials	
2 ordinadors Dell XPS 15	1998.99 x 2= 3997.98€
1 "Eccopower Training Force® – SQUAT"	4335.94€
4 BOSU	174 x 4= 696€
1 aparell Biopac MP36	245€
20 paquets de 50 electrodes d'1cm ² d'Ag/AgCl	10.75 x 18= 193.50€
Subtotal	9223.45€
Total	18178.42€

Taula 5: Costos i pressupost

4 BIBLIOGRAFIA

- Balagué, N., González, J., Javierre, C., Hristovski, R., Aragonés, D., Álamo, J., Niño, O., & Ventura, J. L. (2016). Cardiorespiratory coordination after training and detraining. a principal component analysis approach. *Frontiers in Physiology*, 7(FEB). <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00035>
- Balagué, N., Hristovski, R., Almarcha, M., Garcia-Retortillo, S., & Ivanov, P. C. (2020). Network Physiology of Exercise: Vision and Perspectives. *Frontiers in Physiology*, 11(December). <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.611550>
- Bartsch, R. P., Liu, K. K. L., Bashan, A., & Ivanov, P. C. (2015). *Network Physiology : How Organ Systems Dynamically Interact*. 1–36. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142143>
- Bartsch, R. P., Schumann, A. Y., Kantelhardt, J. W., Penzel, T., & Ch, P. (2012). *Phase transitions in physiologic coupling*. <https://doi.org/10.1073/pnas.1204568109>
- Bashan, A., Bartsch, R. P., Kantelhardt, J. W., Havlin, S., & Ivanov, P. C. (2012). Network physiology reveals relations between network topology and physiological function. *Nature Communications*, 3. <https://doi.org/10.1038/ncomms1705>
- Boyd, A., Gladden, M., McWilliam, P., & Ward, J. (1977). Control of dynamic and static nuclear bag fibres and nuclear chain fibres by gamma and beta axons in isolated cat muscle spindels. *Journal of Physiology*, 1(7445), 133–162. <https://doi.org/10.32388/n9bhv5>
- Brazen, D. M., Todd, M. K., Ambegaonkar, J. P., Wunderlich, R., & Peterson, C. (2010). The effect of fatigue on landing biomechanics in single-leg drop landings. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 20(4), 286–292. <https://doi.org/10.1097/JSM.0b013e3181e8f7dc>
- Burke, R. E., Levine, D. N., Tsairis, P., & Zajac, F. E. (1973). Physiological types and histochemical profiles in motor units of the cat gastrocnemius. *The Journal of Physiology*, 234(3), 723–748. <https://doi.org/doi:10.1113/jphysiol.1973.sp010369>
- Burke, R. E., Strick, P. L., Kanda, K., Kim, C. C., & Walmsley, B. (1977). Anatomy of medial gastrocnemius and soleus motor nuclei in cat spinal cord. *Journal of Neurophysiology*, 40(3), 667–680. <https://doi.org/10.1152/jn.1977.40.3.667>
- Chang, Y. J., Chou, C. C., Chan, H. L., Hsu, M. J., Yeh, M. Y., Fang, C. Y., Chuang, Y. F., Wei, S. H., & Lien, H. Y. (2012). Increases of quadriceps inter-muscular cross-correlation and coherence during exhausting stepping exercise. *Sensors (Switzerland)*, 12(12), 16353–16367. <https://doi.org/10.3390/s121216353>
- Chen, Z., Hu, K., Stanley, H. E., & Novak, V. (2006). *Cross-correlation of instantaneous phase increments in pressure-flow fluctuations : Applications to cerebral autoregulation*. 1–14. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.031915>
- Conway, B. A., Halliday, D. M., Farmer, S. F., Shahani, U., Maas, P., Weir, A. I., & Rosenberg, J. R. (1995). Synchronization between motor cortex and spinal motoneuronal pool during the performance of a maintained motor task in man. *The Journal of Physiology*, 489(3), 917–924. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1995.sp021104>
- D'Agostino, G. (2014). Preface. *Understanding Complex Systems*, 203–222. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-03518-5>
- Del Vecchio, A., Casolo, A., Negro, F., Scorcelletti, M., Bazzucchi, I., Enoka, R., Felici, F., & Farina, D. (2019). The increase in muscle force after 4 weeks of strength training is mediated by adaptations in motor unit recruitment and rate coding. *Journal of Physiology*, 597(7), 1873–1887. <https://doi.org/10.1113/JP277250>
- Douglas, J., Pearson, S., Ross, A., & McGuigan, M. (2017). Chronic Adaptations to Eccentric Training: A Systematic Review. *Sports Medicine*, 47(5), 917–941. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0628-4>
- Duchateau, J., Semmler, J. G., & Enoka, R. M. (2006). Training adaptations in the behavior of human motor units. *Journal of Applied Physiology*, 101(6), 1766–1775. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00543.2006>

- Enoka, R. M. (1996). Invited review. *Journal of Applied Physiology*, 81(6), 2339–2246. <https://doi.org/10.1152/jappl.1996.81.6.2339>
- Farmer, S. F., Bremner, F. D., Halliday, D. M., Rosenberg, J. R., & Stephens, J. a. (1993). THE FREQUENCY CONTENT OF COMMON SYNAPTIC INPUTS TO and the * Department of Physiology, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ. *Physiology*, 127–155.
- Fernandez-Gonzalo, R., Irimia, J. M., Cusso, R., Gustafsson, T., Linné, A., & Tesch, P. A. (2014). Flywheel resistance exercise to maintain muscle oxidative potential during unloading. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 85(7), 694–699. <https://doi.org/10.3357/ASEM.3856.2014>
- Folland, J. P., & Williams, A. G. (2007). The adaptations to strength training: Morphological and neurological contributions to increased strength. *Sports Medicine*, 37(2), 145–168. <https://doi.org/10.2165/00007256-200737020-00004>
- Fort-Vanmeerhaeghe, A., Romero-Rodriguez, D., Lloyd, R. S., Kushner, A., & Myer, G. D. (2016a). Integrative neuromuscular training in youth athletes. Part I: Identifying risk factors. *Strength and Conditioning Journal*, 38(3), 36–48.
- Fort-Vanmeerhaeghe, A., Romero-Rodriguez, D., Lloyd, R. S., Kushner, A., & Myer, G. D. (2016b). Integrative Neuromuscular Training in Youth Athletes. Part II. *Strength and Conditioning Journal*, 38(4), 9–27. <http://journals.lww.com/00126548-201608000-00002>
- Frontera, W. R., & Ochala, J. (2015). Skeletal Muscle: A Brief Review of Structure and Function. *Behavior Genetics*, 45(2), 183–195. <https://doi.org/10.1007/s00223-014-9915-y>
- Garcia-Retortillo, S., Gacto, M., O'Leary, T. J., Noon, M., Hristovski, R., Balagué, N., & Morris, M. G. (2019). Cardiorespiratory coordination reveals training-specific physiological adaptations. *European Journal of Applied Physiology*, 119(8), 1701–1709. <https://doi.org/10.1007/s00421-019-04160-3>
- Garcia-Retortillo, Sergi, Javierre, C., Hristovski, R., Ventura, J. L., & Balagué, N. (2017). Cardiorespiratory coordination in repeated maximal exercise. *Frontiers in Physiology*, 8(JUN), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00387>
- Garcia-Retortillo, Sergi, Rizzo, R., Wang, J. W. J. L., Sitges, C., & Ivanov, P. C. (2020). Universal spectral profile and dynamic evolution of muscle activation: A hallmark of muscle type and physiological state. *Journal of Applied Physiology*, 129(3), 419–441. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00385.2020>
- Gelfi, C., Vasso, M., & Cerretelli, P. (2011). Diversity of human skeletal muscle in health and disease: Contribution of proteomics. *Journal of Proteomics*, 74(6), 774–795. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2011.02.028>
- Heckman, C. J., & Enoka, R. M. (2012). Motor unit. *Comprehensive Physiology*, 2(4), 2629–2682. <https://doi.org/10.1002/cphy.c100087>
- Hermens, H., Freriks, B., Disselhorst-Klug, C., & Rau, G. (2000). Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 10(1), 361–374. [https://doi.org/10.1016/s1050-6411\(00\)00027-4](https://doi.org/10.1016/s1050-6411(00)00027-4).
- Hewett, T. E., Myer, G. D., Kiefer, A. W., & Ford, K. R. (2015). Longitudinal Increases in Knee Abduction Moments in Females during Adolescent Growth. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 47(12), 2579–2585. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000700>
- Hoppeler, H., Lüthi, P., Claassen, H., Weibel, E. R., & Howald, H. (1973). The ultrastructure of the normal human skeletal muscle - A morphometric analysis on untrained men, women and well-trained orienteers. *Pflügers Archiv European Journal of Physiology*, 344(3), 217–232. <https://doi.org/10.1007/BF00588462>
- Ivanov, P. C., Rosenblum, M. G., Peng, C. K., Mietus, J., Havlin, S., Stanley, H. E., & Goldberger, A. L. (1996). Scaling behaviour of heartbeat intervals obtained by wavelet-based time-series analysis. In *Nature* (Vol. 383, Issue 6598, pp. 323–327). <https://doi.org/10.1038/383323a0>
- Joyner, M. J. (2011). Physiology: Alone at the bottom, alone at the top. *Journal of Physiology*,

- 589(5), 1005–1005. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.203893>
- Kattla, S., & Lowery, M. M. (2010). Fatigue related changes in electromyographic coherence between synergistic hand muscles. *Experimental Brain Research*, 202(1), 89–99. <https://doi.org/10.1007/s00221-009-2110-0>
- Krakauer, J., & Ghez, C. (2000). Voluntary movement. *Principles of Neural Science*, 4, 756–781.
- Lamboley, C. R., Murphy, R. M., Mckenna, M. J., & Lamb, G. D. (2014). Sarcoplasmic reticulum Ca²⁺ uptake and leak properties, and SERCA isoform expression, in type I and type II fibres of human skeletal muscle. *Journal of Physiology*, 592(6), 1381–1395. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2013.269373>
- Lindstedt, S. L., Lastayo, P. C., & Reich, T. E. (2010). *When active muscles lengthen: Properties and consequences of eccentric contractions*. 1–9.
- Lloyd, R. S., Meyers, R. W., & Oliver, J. L. (2011). *The Natural Development and Trainability of Plyometric Ability During Childhood* THE INCLUSION OF PLYOMETRICS WITHIN YOUTH-BASED STRENGTH AND CONDITIONING PROGRAMS IS BECOMING MORE POPULAR AS A MEANS TO DEVELOP STRETCH-SHORTENING CYCLE ABILITY. *PLYOMETRIC*. 23–32.
- Maroto-Izquierdo, S., Fernandez-Gonzalo, R., Magdi, H. R., Manzano-Rodriguez, S., González-Gallego, J., & De Paz, J. a. (2019). Comparison of the musculoskeletal effects of different iso-inertial resistance training modalities: Flywheel vs. electric-motor. *European Journal of Sport Science*, 19(9), 1184–1194. <https://doi.org/10.1080/17461391.2019.1588920>
- Miller, L. E., Pierson, L. M., Nickols-Richardson, S. M., Wootten, D. F., Selmon, S. E., Ramp, W. K., & Herbert, W. G. (2006). Knee extensor and flexor torque development with concentric and eccentric isokinetic training. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 77(1), 58–63. <https://doi.org/10.1080/02701367.2006.10599332>
- Morelli, K. M., Brown, L. B., & Warren, G. L. (2018). Effect of NSAIDs on Recovery From Acute Skeletal Muscle Injury: A Systematic Review and Meta-analysis. *American Journal of Sports Medicine*, 46(1), 224–233. <https://doi.org/10.1177/0363546517697957>
- Oliveira, A. S., Corvino, R. B., Caputo, F., Aagaard, P., & Denadai, B. S. (2016). Effects of fast-velocity eccentric resistance training on early and late rate of force development. *European Journal of Sport Science*, 16(2), 199–205. <https://doi.org/10.1080/17461391.2015.1010593>
- Person, R. S., & Mishin, L. N. (1964). Auto-and cross-correlation analysis of the electrical activity of muscles. *Medical Electronics & Biological Engineering*, 2(2), 155–159. <https://doi.org/10.1007/BF02484214>
- Pol, R., Hristovski, R., Medina, D., & Balague, N. (2019). From microscopic to macroscopic sports injuries. Applying the complex dynamic systems approach to sports medicine: a narrative review. *British Journal of Sports Medicine*, 53(19), 1214–1220. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-097395>
- Röhrle, O., Yavuz, U., Klotz, T., Negro, F., & Heidlauf, T. (2019). Multiscale modeling of the neuromuscular system: Coupling neurophysiology and skeletal muscle mechanics. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Systems Biology and Medicine*, 11(6), 1–43. <https://doi.org/10.1002/wsbm.1457>
- Rosenblum, U., Melzer, I., Zeilig, G., & Plotnik, M. (2021). *Muscle Activation Profile While Walking with Perturbations*.
- Sañudo, B., Sánchez-Hernández, J., Bernardo-Filho, M., Abdi, E., Taiar, R., & Núñez, J. (2019). Integrative neuromuscular training in young athletes, injury prevention, and performance optimization: A systematic review. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(18), 1–21. <https://doi.org/10.3390/app9183839>
- Schoenfeld, B. J., Grgic, J., Ogborn, D., & Krieger, J. W. (2017). Strength and Hypertrophy Adaptations Between Low- vs. High-Load Resistance Training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(12), 3508–3523. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000002200>
- Taylor, A., Ellaway, P. H., Durbaba, R., & Rawlinson, S. (2000). Distinctive patterns of static and

- dynamic gamma motor activity during locomotion in the decerebrate cat. *Journal of Physiology*, 529(3), 825–836. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2000.00825.x>
- Timpka, T., Jacobsson, J., Bickenbach, J., Finch, C. F., Ekberg, J., & Nordenfelt, L. (2014). What is a sports injury? *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 44(4), 423–428. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0143-4>
- Uryumtsev, D. Y., Gulyaeva, V. V., Zinchenko, M. I., Baranov, V. I., Melnikov, V. N., Balioz, N. V., & Krivoschekov, S. G. (2020). Effect of Acute Hypoxia on Cardiorespiratory Coherence in Male Runners. *Frontiers in Physiology*, 11(June), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00630>
- Zech, A., Hübscher, M., Vogt, L., Banzer, W., Hänsel, F., & Pfeifer, K. (2010). Balance training for neuromuscular control and performance enhancement: A systematic review. *Journal of Athletic Training*, 45(4), 392–403. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-45.4.392>