

Chimica Organica Industriale

Docente

Luca Bernardi

Appunti di lezione

Redattore

Alessandro Suprani

alessandro.suprani@studio.unibo.it

Laurea Magistrale in Chimica Industriale

Anno Accademico 2024/2025

Indice

1	Introduzione	2
1.1	SELECT	2
1.2	Panoramica sull'industria farmaceutica	3
2	La selezione della via sintetica e le sintesi multi-step	4
2.1	Selezione della via sintetica	4
2.2	Sintesi organica multi-step	7
2.2.1	RoS Convergente o Lineare	7
2.2.2	La posizione degli step a bassa resa	9
2.2.3	La posizione degli step più costosi	10
2.3	L'economia degli step sintetici	10
2.4	Telescoping	12
2.5	Le reazioni redox	12
3	Considerazioni pratiche per lo scale-up e l'equipaggiamento	13
4	La sicurezza nello scale-up	13
5	Impatto ambientale	13
6	Selezione dei reagenti	13
7	Selezione del solvente	13
7.1	Solventi	13
7.1.1	Reazioni senza solvente	14
7.1.2	Recupero del solvente	14
8	Workup, purificazione e impurità	16
8.1	Work up	16
8.2	Quenching	16
8.3	Control	18
8.4	Stabilità degli intermedi e dei prodotti in fase finale	18
8.4.1	impurezze	18
8.4.2	control	18
8.4.3	design of experiment	18

1 Introduzione

Il corso di Chimica Organica Industriale tratta il come ottenere materiali organici in maniera sostenibile, sicura ed economicamente efficiente. E' un intricato mix di sintesi organica, chimica industriale e green chemistry in quanto devono essere prese in considerazione variabili che vanno dalle dimensioni dell'impianto all'utilizzo e natura dei solventi. Si parla principalmente di industria farmaceutica e in particolare quella parte che produce gli **API** (Active Pharmaceutical Ingredients) ovvero l'ingrediente biologicamente attivo all'interno del farmaco. Gli API devono essere preparati con delle **GMP** (Good Manufacturing Practices) per poter essere vendute e non bloccate dagli enti vigenti. Gli API sono quindi inseriti poi nel farmaco classificato come specialty chemical. Per specialty chemical si intende una miscela di sostanze che vengono vendute sulla base di ciò che possono fare, in genere con specifiche applicazioni e prodotte in relativi bassi volumi e si differenzia dai fine chemicals in quanto essi sono singole sostanze chimiche prodotte in impianti multiuso a basso volume alto prezzo basato su quello che sono. In genere un fine chemical viene trattato per produrre una speciality (una molecola bioattiva unita ad altre cose può dare un farmaco).

1.1 SELECT

Quando si seleziona una via sintetica per produzione industriale si può fare riferimento all'acronimo SELECT per comprendere la migliore via:

- **SAFETY**: la sicurezza prima di tutto
- **ENVIRONMENTAL**: seguendo i principi della green chemistry
- **LEGAL**: evitare di pagare eccessivi costi per i brevetti
- **ECONOMICS**: economicamente vantaggioso
- **CONTROL**: controllo sulla qualità e sui problemi che possono sorgere
- **THROUGHPUT**: produttività

Safety

La sicurezza è il parametro più importante, in quanto gli incidenti in impianto possono avere drammatiche conseguenze. Quando si studia lo scale up di un sistema bisogna tenere in considerazione più dettagli di quelli laboratoriali (quantità di vapori di solvente, sottoprodotti pericolosi, reazioni esotermiche possono portare ad esplosioni etc)

Environment

Bisogna tenere in considerazione due importanti fattori: l'impatto ambientale e la sostenibilità. I parametri considerati per l'impatto ambientale sono tossicità globale, consumo di ozono e effetti sul cambiamento climatico. I parametri considerati per la sostenibilità sono il consumo delle risorse naturali, materiali utilizzati e scarti generati, processi energeticamente inefficienti. La metrica più utile è la **Life Cycle Assessment (LCA)** ma è anche complicata da utilizzare.

Legal

I brevetti chimici sono concessi per la "composizione della materia" o per i "processi", e i brevetti per la composizione della materia vengono depositati all'inizio dello sviluppo di un composto. Se il metodo per preparare grandi quantità di una sostanza farmacologica differisce significativamente da quello descritto nel brevetto di composizione, può essere considerato il deposito di un brevetto di processo. Chi desidera utilizzare il materiale o il processo descritto in un brevetto altrui deve richiedere il permesso, solitamente pagando i costi di licenza. Sviluppare processi ottimali richiede molti anni e ingenti somme di denaro, quindi per evitare di avvantaggiare i concorrenti, alcune aziende non divulgano mai i loro processi ottimali. Tuttavia, i dettagli forniti nei brevetti possono essere molto utili per sviluppare processi per composti simili, e il rischio di non richiedere un brevetto per nuovi composti o processi è che i concorrenti possano brevettare il lavoro svolto dalla tua azienda. In alcuni casi, le aziende decidono di pubblicare il loro lavoro su riviste per impedire ad altri di brevettarlo, e quando intermedi brevettati fanno parte del percorso pianificato, le aziende possono creare percorsi alternativi non violanti per evitare la necessità di licenze.

Un aspetto legale riguarda l'uso, il trasporto e lo smaltimento delle sostanze chimiche, poiché i prodotti chimici esplosivi possono avere restrizioni nel trasporto e l'uso di sostanze chimiche precursori di droghe

illegite può richiedere un notevole carico burocratico, come nel caso dell'acido fenilacetico (precursore della metanfetamina), per il cui acquisto è necessario dimostrare il lecito impiego. La legislazione, come il REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals), cerca di ridurre l'uso di sostanze chimiche pericolose in Europa, e sempre più sostanze vengono sottoposte ad autorizzazione, il che significa che possono essere utilizzate solo in condizioni strettamente controllate. REACH identifica le sostanze pericolose la cui produzione e uso su larga scala necessitano di autorizzazione, esercitando una forte pressione per trovare sostituti.

Economics

Il costo dei beni (CoG) è influenzato dal costo delle materie prime, della manodopera, del controllo qualità e dello smaltimento dei rifiuti. Un obiettivo primario è ridurre il costo dell'API a €1000–€3000/Kg. Questi costi sono una parte del costo complessivo del farmaco, che include la produzione dell'API, la formulazione e il confezionamento. Per minimizzare i CoG, la chimica deve essere efficiente e robusta, e rigorosi controlli in-process (IPC) sono cruciali per garantire operazioni di routine che producano prodotti di alta qualità. I materiali di partenza e i reagenti devono essere studiati attentamente.

Per ridurre l'investimento di capitale, si utilizza attrezzatura polivalente durante lo sviluppo in modo tale da poter fare retrofitting dell'impianto; quando le vendite di un composto diventano più certe, può essere giustificato l'acquisto di attrezzature dedicate e specializzate.

Control

Il processo per produrre un API deve essere robusto e garantire un materiale di qualità costante. Gli In-Process-Control (IPC) sono implementati per assicurare la qualità costante del prodotto e controllare la quantità di impurità. La Quality by Design (QbD) prevede l'identificazione delle impurità e delle loro cause, per controllarne la quantità piuttosto che concentrarsi sulla loro rimozione, che non è sempre possibile.

Productivity

La produttività si riflette non solo nei rendimenti isolati, ma anche nella quantità di prodotto ottenuta per unità di volume o tempo (resa spazio-tempo). Nelle operazioni di scale-up, la produttività è legata alla quantità di prodotto ottenuta per volume di reattore al giorno.

$$\frac{\text{Quantità di prodotto (Kg)}}{\text{Volume di reattore(L) x tempo(h)}} = \text{Produttività} \frac{\text{Kg}}{\text{L h}}$$

Per aumentare la produttività, si sviluppano condizioni che minimizzano i tempi di reazione, semplificano le operazioni e rendono il processo più efficiente.

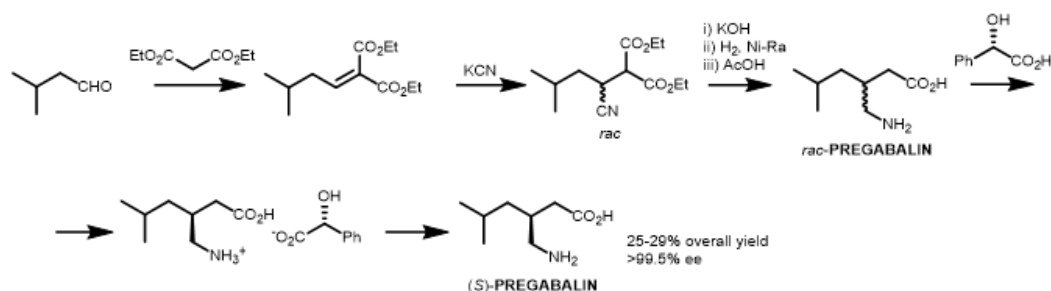
1.2 Panoramica sull'industria farmaceutica

Le forze trainanti dell'industria farmaceutica sono lo sviluppo di farmaci per migliorare la salute e la qualità della vita, oltre a garantire un ritorno agli investitori. Tuttavia, l'ambiente ad alto rischio è caratterizzato da incertezze, specialmente nella comprensione della biologia. Nonostante ciò, i premi possono essere significativi. Le sfide includono lo sviluppo di nuovi farmaci, con una complessità strutturale crescente e una maggiore attenzione da parte delle autorità regolatorie.

Lo sviluppo di un farmaco richiede 5-13 anni e comprende diverse fasi. In fase preclinica, si identifica la nuova entità chimica (NCE) con le proprietà fisico-chimiche adatte e si valuta la tossicità, la sicurezza, la farmacocinetica e il metabolismo tramite esperimenti in vitro e in vivo su animali. Nei trial clinici su esseri umani, la Fase I valuta la tossicità su volontari sani, la Fase II esplora l'efficacia e la sicurezza in piccoli gruppi di pazienti affetti dalla malattia target, mentre la Fase III comprende studi su un vasto numero di pazienti per determinare sicurezza ed efficacia. La Fase IV include studi di sorveglianza post-approvazione.

La chimica dei processi ottimizza la preparazione del principio attivo (API), riducendo le impurità, semplificando le procedure e isolando la forma finale desiderata. Gli sviluppi farmaceutici sono influenzati da fattori finanziari, politici e governativi (come ha dimostrato l'epidemia COVID-19, in cui il vaccino è stato prodotto industrialmente in tempi record).

-Pregabalin launch process:



-Second generation process (from 3Q 2006):

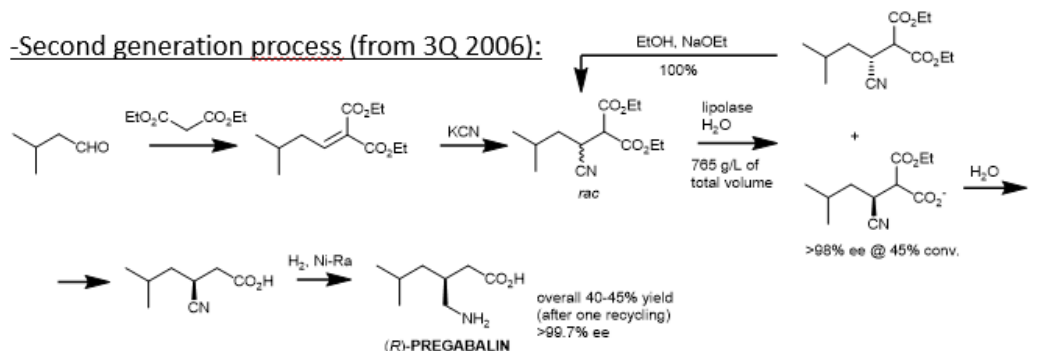


Figura 1: In alto, la sintesi impiegata come primo percorso al lancio, sotto la sintesi ottimizzata

Nonostante l'emergere di batteri resistenti agli antibiotici, lo sviluppo di nuovi farmaci antibiotici è rallentato a causa dei costi di sviluppo e della bassa redditività. Le industrie farmaceutiche possono richiedere supporto governativo per lo sviluppo di farmaci per il terzo mondo. Gli "orphan drugs" sono farmaci sviluppati per trattare condizioni mediche rare che non sarebbero redditizie senza assistenza governativa. La FDA ha 4 programmi per accelerare l'approvazione dei farmaci. È importante investire saggiamente nelle fasi di sviluppo dei processi, poiché la maggior parte dei composti non supera le fasi di Ricerca e Sviluppo e molti farmaci non recuperano i costi di investimento. La sintesi deve essere ottimizzata durante le fasi cliniche. Negli anni passati, molte di queste fasi venivano eseguite internamente. Tuttavia, negli ultimi 15 anni, le aziende farmaceutiche hanno ridotto la propria capacità interna. Molti componenti sono gestiti da una vasta rete di partner di produzione esterna in tutto il mondo, e se uno di questi componenti fallisce, si crea un bottleneck che si ripercuote su tutta la catena di produzione. Per quanto riguarda i fitofarmaci, l'attuale ricerca e sviluppo nel settore della protezione delle colture non può più essere distinta dalla ricerca e sviluppo farmaceutica in quanto entrambe richiedono rigore scientifico e risultati di alta qualità. I tempi di sviluppo del prodotto variano da 8 a 12 anni. Le strutture delle molecole sono simili a quelle dei farmaci, sebbene leggermente più semplici. E' sempre bene tenere a mente che anche se i requisiti in termini di qualità del prodotto possono variare tra i settori industriali, la maggior parte delle considerazioni relative allo scale up di una sintesi di un fine chemical sono valide per tutti i settori (specialmente la sicurezza e l'ambiente).

2 La selezione della via sintetica e le sintesi multi-step

2.1 Selezione della via sintetica

Selezionare una via sintetica è generalmente il primo passo per lo sviluppo di un processo chimico, e cambiarla può influenzare la selezione di reagenti, solventi, condizioni di reazione, lavorazioni, cristallizzazioni e altro ancora.

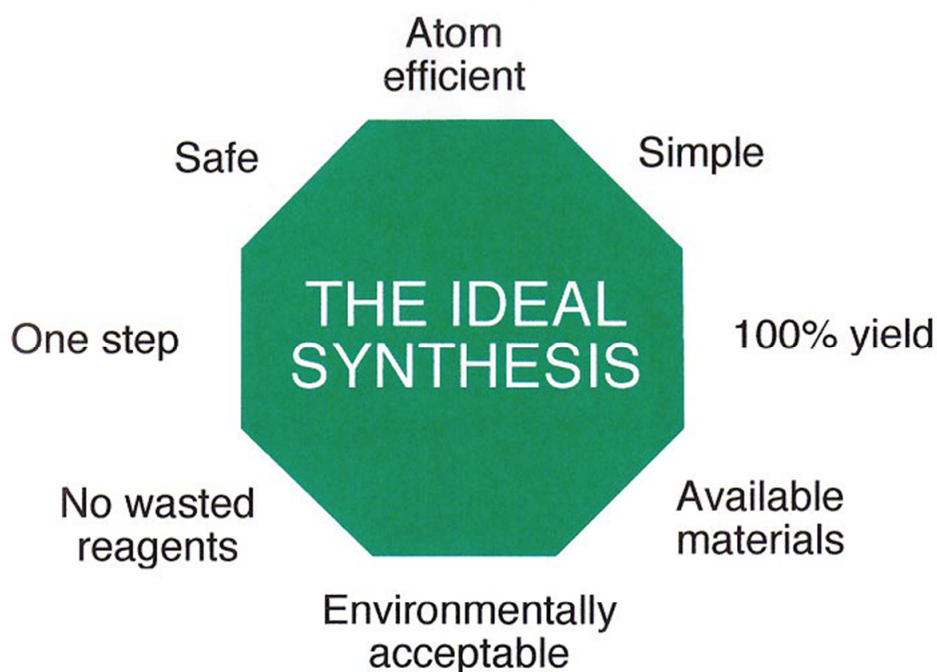
Le linee guida possono essere suddivise in due categorie principali: i) realizzare una sintesi efficiente e ii) rendere questa sequenza sicura e scalabile.

- **Sintesi organica multi-step efficiente:**

- * Utilizzare reazioni ad alto rendimento
- * Reazioni atomicamente economiche
- * Sequenze sintetiche convergenti
- * Reazioni catalitiche
- * Limitare l'uso di gruppi protettori
- * Economia redox
- * Posizionare i passaggi a basso rendimento all'inizio della sintesi

- **Chimica di processo efficiente e sicura:**

- * Controllare le reazioni esotermiche e gli eventi esplosivi
- * Evitare reagenti tossici, se non possibile usarli all'inizio della sintesi
- * Limitare le lavorazioni e persino le isolazioni
- * Evitare l'isolamento di intermedi genotossici tramite telescoping (esposizione dei lavoratori)
- * Utilizzare intermedi cristallini per facilitare la purificazione (specialmente il penultimo)
- * Definire punti di purificazione nella sintesi per il controllo
- * Utilizzare il minor numero di solventi
- * Utilizzare solventi e reagenti che non causano problemi di scale up

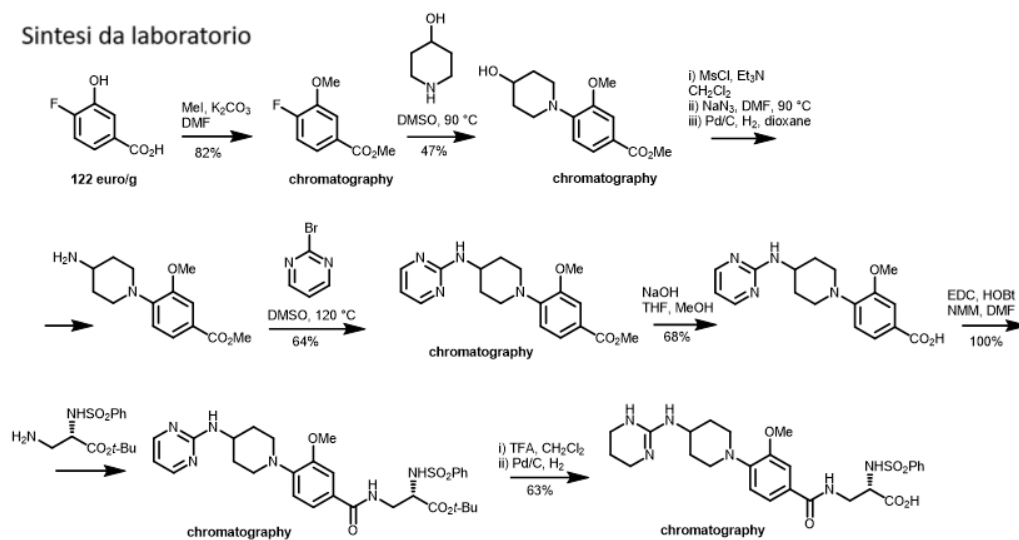


La scelta della via di sintesi (RoS) è spesso un compromesso che risulta dalla valutazione dei pro e contro delle diverse possibili vie di sintesi.

Fattori "soft" come la robustezza del processo e la disponibilità delle materie prime sono almeno altrettanto importanti per giudicare la qualità di un processo chimico. Ad esempio, non sarebbe ideale avere un solo fornitore di una materia prima, per considerazioni di prezzo e disponibilità, o utilizzare una via di sintesi che impiega una reazione notoriamente poco maneggiabile (ad esempio, una reazione altamente sensibile alla temperatura, alla purezza del solvente, ecc.).

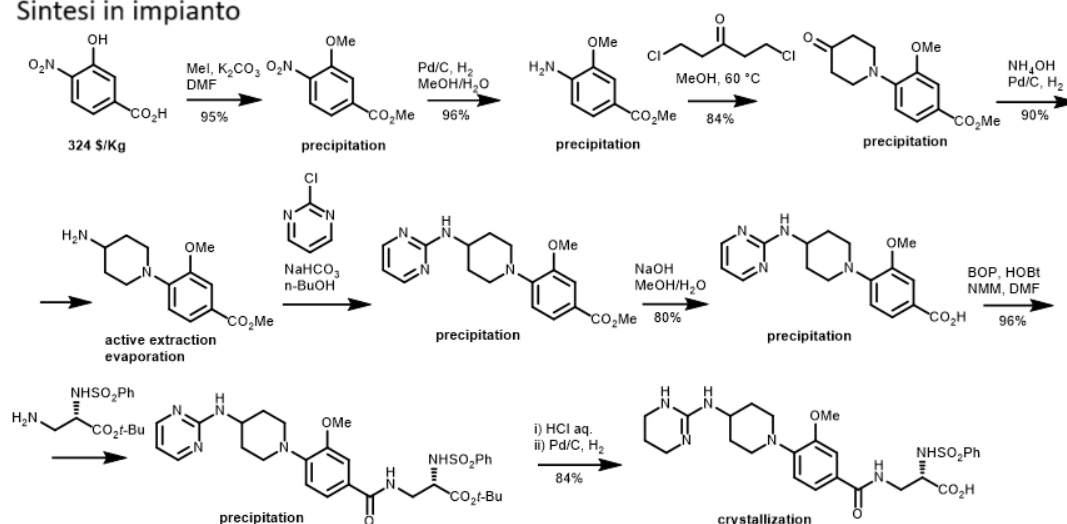
Una via sintetica eccellente per la scoperta di farmaci potrebbe essere scarsa per la produzione e viceversa. La sintesi in chimica medicinale consente la preparazione rapida di una serie di analoghi, adatti a rapidi screening di attività (ad esempio partendo da composti fluorurati che possono essere facilmente sostituiti ma molto costosi). La sintesi orientata al target (produzione) ha come obiettivo un singolo target, da produrre nel modo più diretto ed efficiente possibile (partendo quindi da molecole poco costose, con intermedi non pericolosi).

Sintesi da laboratorio



- Dieci passaggi (reso complessivo del 10,5%), materiale di partenza molto costoso con un fluoro.
- Uso di azide (esplosivo).
- Sostanza chimica molto tossica (azide).
- Cinque purificazioni cromatografiche.

Sintesi in impianto



- Materiale di partenza economico.
- 9 (2 in un unico reattore) passaggi, resa del 44,5%, >99% di purezza del prodotto finale.
- Nessuna cromatografia, diverse operazioni (precipitazioni, estrazione attiva).
- Nessuna azide (la piperidina è generata da una amminazione riduttiva).
- Viene utilizzato un reagente alchilante tossico, ma solo all'inizio.

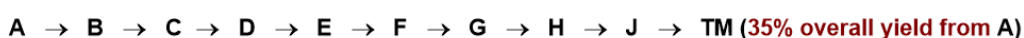
2.2 Sintesi organica multi-step

Nel processo di sviluppo di un percorso per produrre un composto desiderato attraverso diverse trasformazioni, la priorità principale è garantire l'efficienza dello schema e della strategia sintetica. Alcuni suggerimenti per ottenere una sintesi organica multi-step efficiente includono l'uso di reazioni ad alto rendimento, sequenze sintetiche convergenti e limitare l'uso di gruppi protettivi. Tuttavia, è fondamentale che la sequenza soddisfi tutti gli altri requisiti per diventare un processo scalabile, indipendentemente dalla sua efficienza. Questo approccio mira a ottimizzare la produzione di un composto desiderato nel modo più efficiente e sicuro possibile.

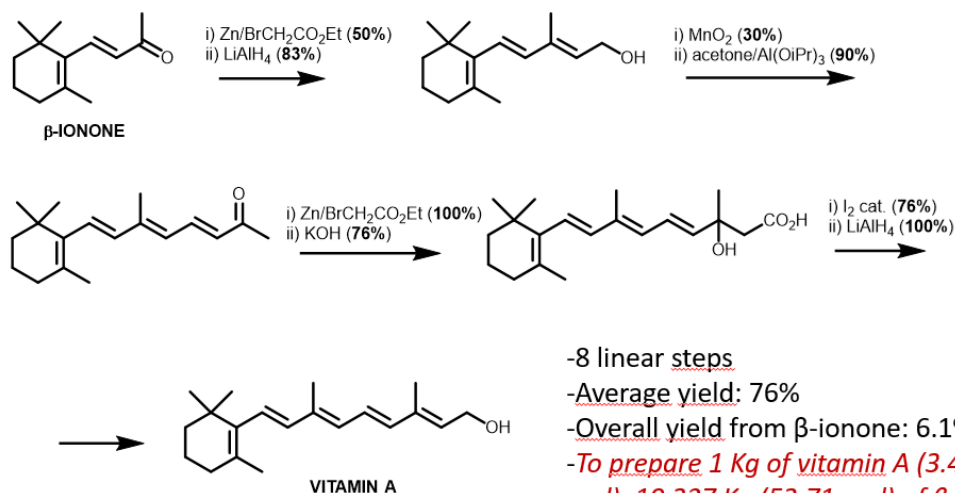
2.2.1 RoS Convergente o Lineare

Al fine di ottenere la migliore ottimizzazione è bene tenere a mente due tipi di sintesi impiegabili, la sintesi lineare e quella convergente: Per sintesi lineare si intende una sintesi che parte dal materiale grezzo (A) al materiale target (TM) con una sequenza lineare di trasformazioni.

Linear 10 step synthesis with 90% Y each step:



-A linear synthesis of Vitamin A from β-ionone:



-8 linear steps

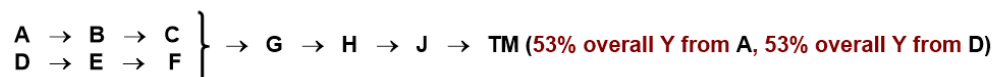
-Average yield: 76%

-Overall yield from β-ionone: 6.1%

-To prepare 1 Kg of vitamin A (3.49 mol), 10.327 Kg (53.71 mol) of β-ionone are required.

Mentre quando si parla di sintesi convergente si sta configurando un percorso sintetico che incorpora sottopercorsi convergenti portando le quantità totali di intermedi necessari per preparare un prodotto a potenzialmente diminuire drasticamente. Gli schemi convergenti hanno un rendimento maggiore rispetto a quelli lineari.

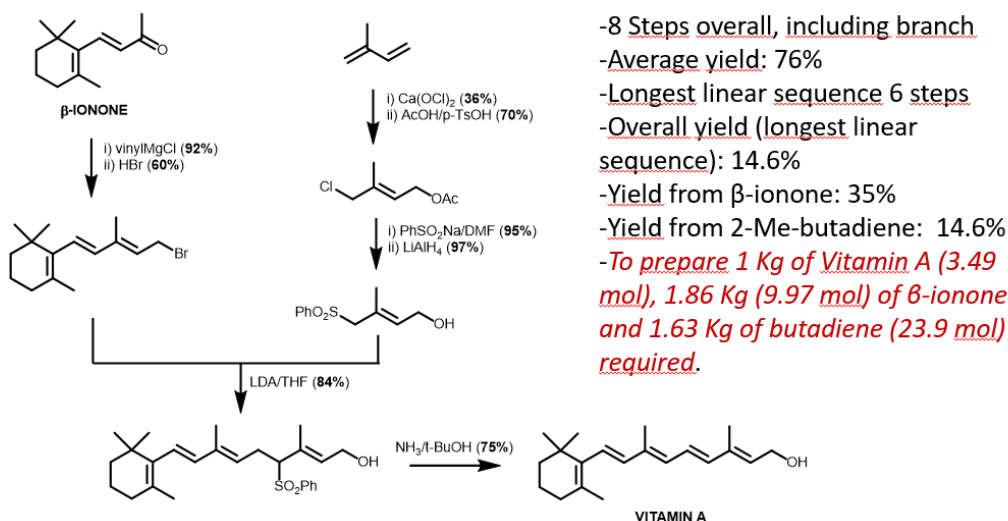
Convergent synthesis with early branching, 6 steps longest linear sequence, 90% Y each step:



Convergent synthesis with late branching, 5 steps longest linear sequence, 90% Y each step:



-A **convergent** synthesis of Vitamin A from β -ionone:



To prepare 1 Kg of Vitamin A:

Linear synthesis (average Yield 76%) \rightarrow >10 Kg of β -ionone

Convergent synthesis (average Yield 76%) \rightarrow 1.86 Kg of β -ionone

In retrosintesi è meglio disconnettere una molecola in modo tale da avere due frammenti di dimensioni comparabili, portando alla maggiore semplificazione. Incorporare la convergenza in una via sintetica offre diversi vantaggi. Innanzitutto, poiché la quantità totale di intermedi diminuisce, sono necessarie quantità minori di reagenti e materiali di partenza, il che riduce i costi. In secondo luogo, batch più piccoli aumentano la flessibilità, consentendo l'uso di recipienti più piccoli. Questo aspetto è particolarmente vantaggioso nei processi di produzione, dove la flessibilità può tradursi in una maggiore efficienza operativa. Infine, nelle sintesi lineari estese, gli intermedi intermedi e finali diventano "sempre più preziosi". L'introduzione della convergenza riduce il valore degli intermedi e la responsabilità derivante da errori di scala, migliorando così l'affidabilità e la sicurezza del processo produttivo.

2.2.2 La posizione degli step a bassa resa

I passaggi a basso rendimento sono indesiderati ma talvolta inevitabili, spesso legati alla risoluzione degli enantiomeri, che ha un rendimento massimo del 50%. Un suggerimento efficace è posizionare questi passaggi a basso rendimento nelle prime fasi della sequenza di sintesi. Questo approccio riduce la quantità di materiale da trasportare nei passaggi successivi, ottimizzando così l'uso delle risorse. Se la risoluzione degli enantiomeri viene effettuata alla fine della sequenza, si rischia di utilizzare (e sprecare) reagenti e risorse per preparare anche l'enantiomero indesiderato. Questo non solo aumenta i costi, ma rende anche il processo meno efficiente. Pertanto, è strategicamente vantaggioso affrontare i passaggi a basso rendimento il prima possibile nella sintesi.

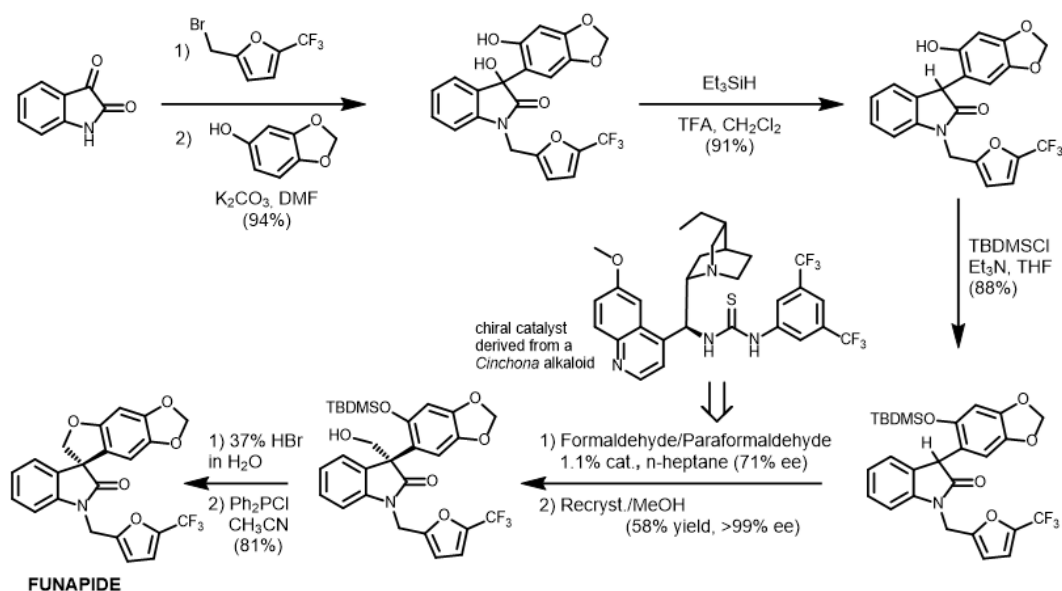


Figura 2: Si usa un agente alchilante nel primo step così da assicurarsi di rimuoverlo completamente, si usa un catalizzatore asimmetrico per poter ottenere uno stereocentro adeguato alla reazione di ciclizzazione che non fornisce l'enantiomero

2.2.3 La posizione degli step più costosi

Gli step con reagenti costosi devono essere utilizzati il più tardi possibile.

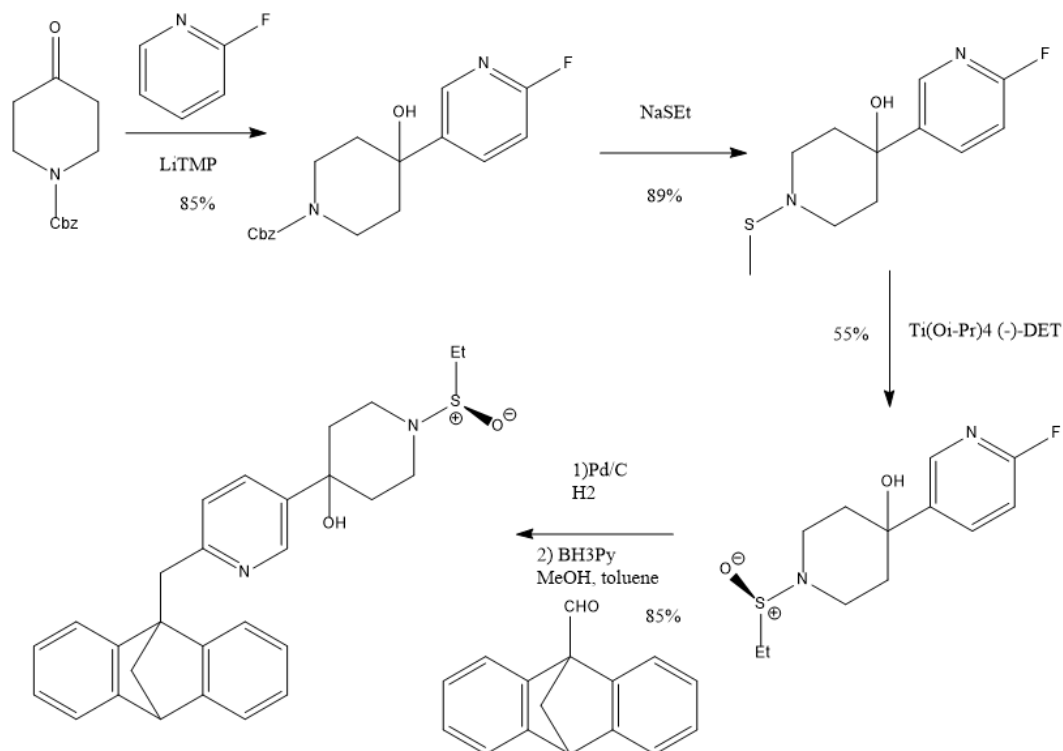


Figura 3: l'aldeide, il reagente più costoso, è posizionato nell'ultimo passaggio, abbassandone i costi ad un quarto

2.3 L'economia degli step sintetici

Il percorso sintetico con il minor numero di passaggi è spesso il più ecologico ed economico, e meno sono i passaggi, minori sono le opportunità di errori. I "passaggi di concessione" sono quelle trasformazioni in una sequenza sintetica che non contribuiscono direttamente alla costruzione della struttura o all'installazione delle funzionalità del composto bersaglio. Esempi tipici di questi passaggi sono alcune operazioni redox e l'uso di gruppi protettivi o ausiliari, che dovrebbero essere evitati quando possibile per rendere la sintesi più diretta. Ad esempio, l'utilizzo di un ausiliario chirale richiede due passaggi aggiuntivi: uno per la sua

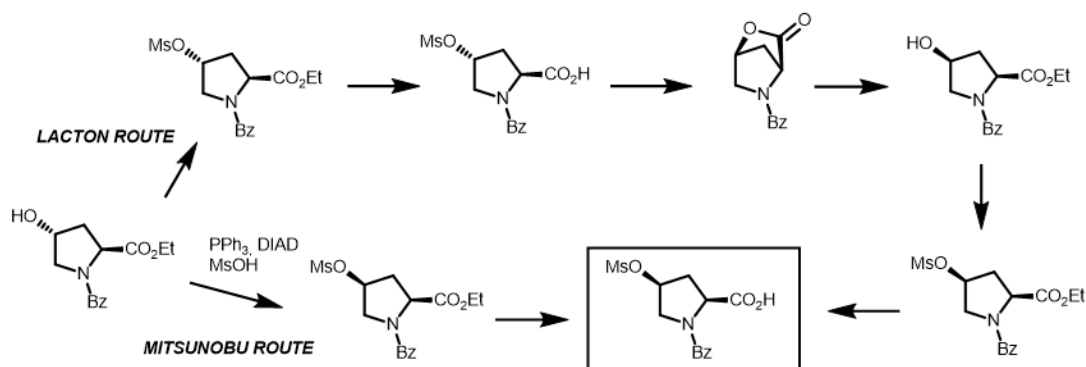


Figura 4: La mitsunobu (reazione non particolarmente eco friendly) in questo caso rappresenta la via più green in quanto permette la sintesi in 2 passaggi rispetto ai 6 della sintesi che impiega il lattone

installazione e uno per la sua rimozione. Sarebbe molto più efficiente eseguire una sintesi asimmetrica.

Ogni gruppo protettivo aggiunge passaggi per la protezione e la deprotezione, che possono occupare spazio nel reattore e ridurre la produttività, aumentando i costi del prodotto a causa dei reagenti e dei passaggi extra necessari. Inoltre, i gruppi più grandi consumano più volume nei reattori, riducendo la quantità di prodotto che può essere processata. Ad esempio, è preferibile utilizzare un gruppo protettivo

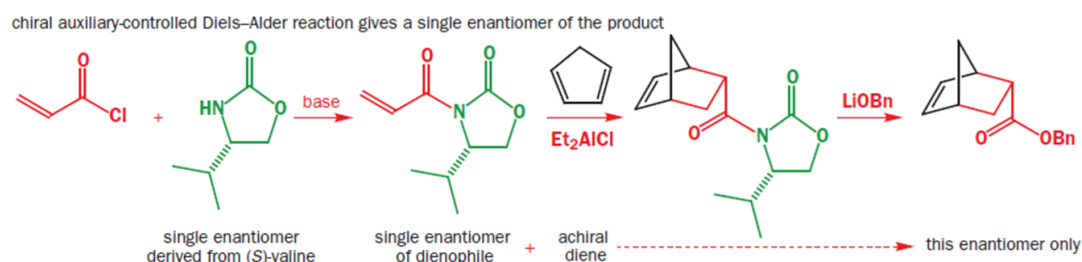


Figura 5: L'utilizzo di un diene achirale con uno specifico enantiomero fornisce l'enantiomero target, evitando la formazione della controparte e rimuovendo quindi aggiuntivi costi legati alla miscela racemica

acetilico anziché un gruppo 9-fluorenilmetossicarbonile (Fmoc), a patto che altre considerazioni (come la cristallinità degli intermedi, la facilità di deprotezione e l'eliminazione di reazioni collaterali successive) siano favorevoli. Per lo sviluppo rapido di un nuovo farmaco, il miglior percorso potrebbe essere quello con il minor numero di gruppi protettivi. Ovviamente, il miglior gruppo protettivo è non averne affatto, ma raggiungere questo obiettivo può essere difficile.

In alcuni casi, la protonazione delle ammine o l'ionizzazione degli acidi carbossilici possono essere efficaci in sostituzione dei gruppi protettivi. Con la chimica organica tradizionale, di solito non è stato possibile evitare del tutto i gruppi protettivi. Tuttavia, le trasformazioni enzimatiche spesso forniscono la selettività necessaria senza bisogno di gruppi protettivi, riducendo così la lunghezza della sintesi. Altri trucchi per ridurre l'impatto (economico e ambientale) dei gruppi protettivi:

- Usare gruppi protettivi temporanei
- Usare condizioni che permettano deprotezioni simultanee

Un buona approccio per risparmiare tempo è quello di eseguire più di una trasformazione sintetica in un solo passaggio utilizzando un reagente che possa fare più di una reazione (deprotezione e riduzione ad esempio).

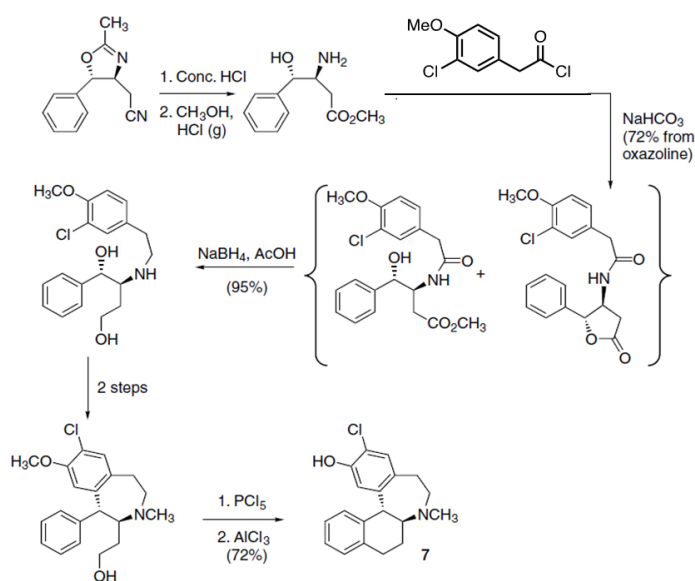


Figura 6: Esempio di una sintesi che impiega lo stesso reagente per più reazioni (Passaggio 1: doppia idrolisi dall'HCl concentrato; Passaggio 4: Riduzione di un'amide e dell'estere; Passaggio 8: AlCl_3 che ciclizza e demetila l'etere

2.4 Telescoping

Il processo di "telescoping", noto anche come concatenazione o processo in continuo, è il metodo in cui gli intermedi non vengono isolati ma piuttosto portati avanti nei passaggi successivi. Questo approccio coinvolge l'esecuzione di multiple trasformazioni senza isolare direttamente gli intermedi. Le soluzioni che subiscono telescoping degli intermedi possono subire estrazione, filtrazione (purché il prodotto rimanga nel filtrato) e scambio di solvente, ma gli intermedi vengono mantenuti in soluzione e mandati alla trasformazione successiva. Questa tecnica, quando utilizzata correttamente, può aumentare significativamente i rendimenti complessivi.

Ma perchè fare telescoping? L'isolamento degli intermedi presenta diversi svantaggi. Spesso è costoso e comporta inevitabilmente una certa perdita di materiali preziosi. Su scala industriale, il processo di isolamento degli intermedi e degli ingredienti farmaceutici attivi (API) richiede risorse significative, rappresentando circa il 50% del tempo del personale e il 75% delle spese finanziarie per l'attrezzatura. Inoltre, la manipolazione aggiuntiva richiesta aumenta sia l'esposizione degli operatori a materiali farmacologicamente potenti che il rischio di contaminazione dei batch e perdita di prodotto.

A meno che non si realizzi una significativa purificazione o altri benefici mediante l'isolamento degli intermedi, il processo di telescoping viene incorporato come parte di percorsi economicamente vantaggiosi. Oltre alla convenienza economica e di processo, il telescoping garantisce una minore esposizione degli operatori a sostanze potenzialmente dannose, alzando quindi la sicurezza dell'impianto.

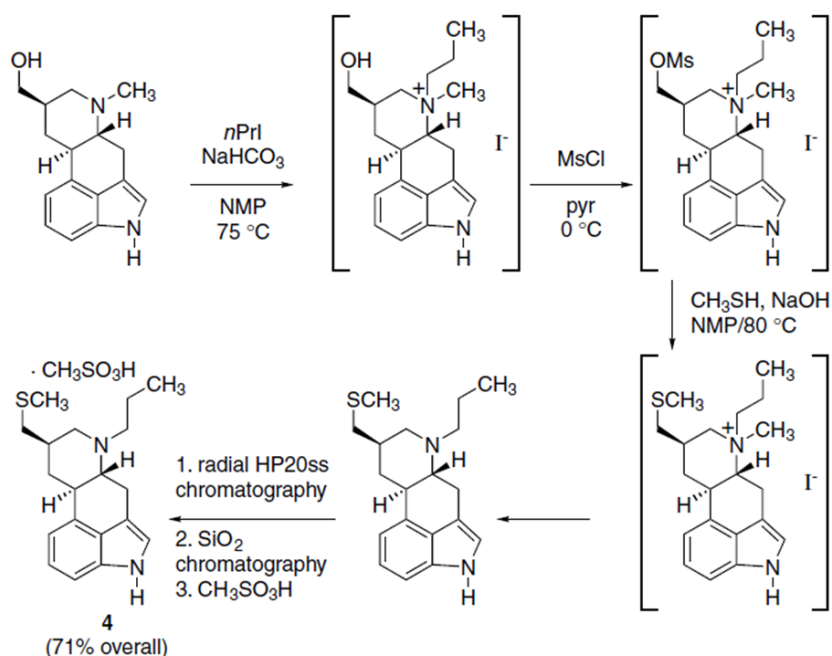


Figura 7: I solidi vengono maneggiati solamente due volte, evitando l'esposizione degli operatori

2.5 Le reazioni redox

L'economia redox rappresenta un concetto fondamentale nella sintesi chimica, mirato a ottimizzare l'efficienza e la sostenibilità dei processi. In sostanza, si tratta di ridurre al minimo le ossidazioni e le riduzioni non necessarie durante una reazione. Questo approccio suggerisce l'utilizzo di materie prime che già possiedono lo stato di ossidazione desiderato per i prodotti finali, evitando così passaggi superflui e dispendiosi. Inoltre, nell'ambito di sintesi più lunghe, si cerca di evitare operazioni redox non strategiche o ridondanti, come ad esempio la riduzione di un chetone seguita da un'ossidazione in un passaggio successivo.

In pratica, l'implementazione di un'economia redox efficace può portare a una significativa riduzione dei costi, dei rifiuti e dell'impatto ambientale associati alla produzione chimica. Questo approccio si basa sull'ottimizzazione dei processi, utilizzando in modo efficiente le risorse disponibili e minimizzando gli sprechi. Inoltre, favorisce lo sviluppo di metodologie sintetiche più pulite e sostenibili, allineate con i principi della chimica verde.

- 3 Considerazioni pratiche per lo scale-up e l'equipaggiamento
- 4 La sicurezza nello scale-up
- 5 Impatto ambientale
- 6 Selezione dei reagenti
- 7 Selezione del solvente
- 7.1 Solventi

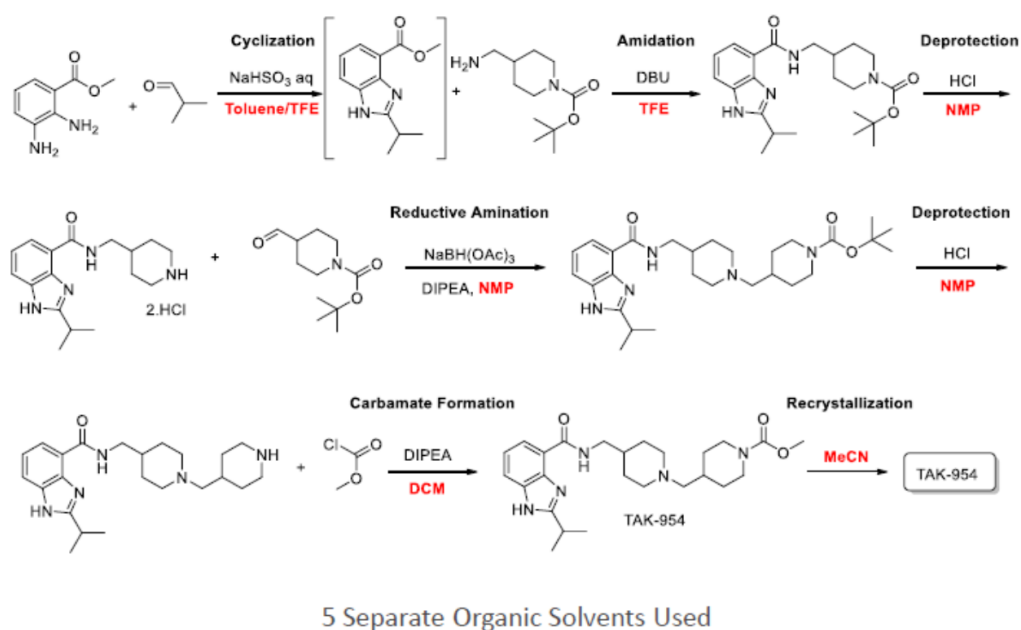


Figura 8: Sintesi utilizzando diversi solventi. **NOTA** ben 5 diversi tipi di solventi vengono impiegati

La reazione di ciclizzazione avviene grazie ad una soluzione acquosa di solfito. Il passaggio successivo è un'amidazione utilizzando DBU (diazabicycloundecene), una base forte (se protonata, forma due forme di risonanza stabili). Successivamente, avviene la rimozione del BOC con HCl in NMP (N-metilpirrolidinone), ottenendo così un'ammina che subisce una amminazione riduttiva con $\text{NaBH}(\text{OAc})_3$. Dopodiché, deproteggiamo nuovamente per formare il carbamato e infine ricristallizziamo per ottenere il prodotto finito. Sono utilizzati vari solventi per questa sintesi, ma può essere condotta anche totalmente in acqua.

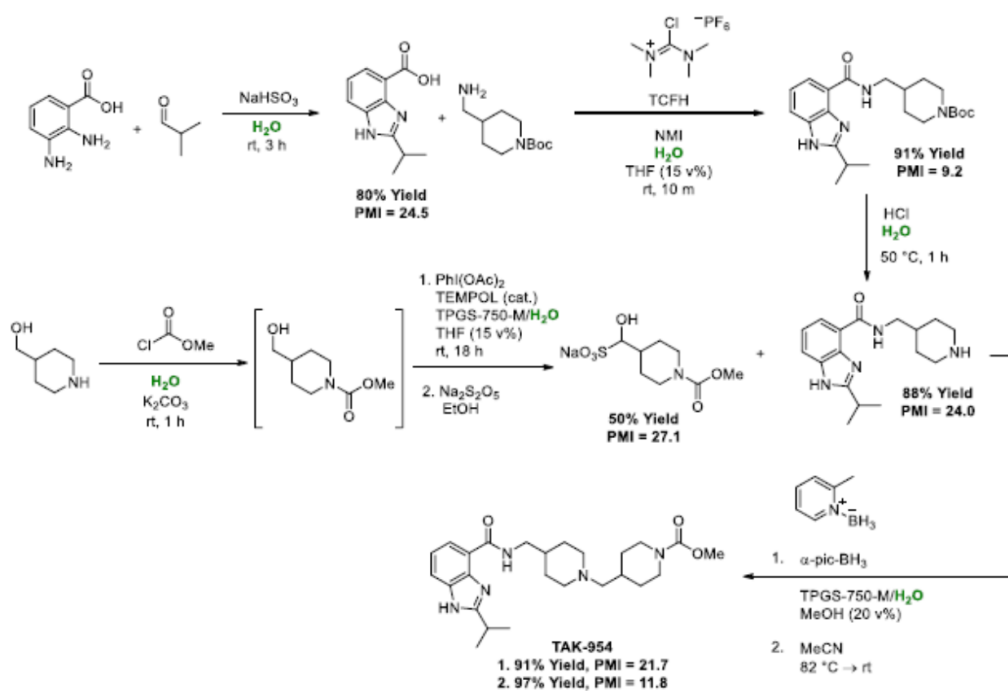


Figura 9: Nuova sintesi che impiega esclusivamente acqua come solvente

Per condurla in acqua, la sintesi subisce delle modifiche: il reagente iniziale reagisce con NaHSO_3 in condizioni acide per favorire il prodotto, e invece dell'estere come reagente viene utilizzato l'acido carbossilico, che migliora la miscelazione dei prodotti con l'acqua. Questo porta a una modifica nel secondo passaggio, poiché abbiamo bisogno di un reattivo di accoppiamento (NMI, N-metilimidazolo) che forma un carbonile attivato. L'NMI attacca prima l'ammina che l'acqua, quindi non si verifica l'idrolisi. Si rimuove la protezione del BOC con HCl e acqua, quindi si ossida l'alcol con TEMPOL e una piccola quantità di THF per permettere l'agitazione. Si ottiene così l'addotto di solfito. Procediamo con l'amminazione riduttiva tra il prodotto precedente e quello ottenuto all'inizio tramite borano, un agente riducente. La resa in acqua è migliore rispetto a quella ottenuta in solventi organici, con migliori PMI e utilizzando anche meno acqua, paradossalmente. Se si lavora con gruppi polari, è conveniente utilizzare l'acqua poiché questi gruppi sono facilmente miscibili in essa. Inoltre, è possibile sfruttare il pH dell'acqua per modificare la solubilità dei composti e far precipitare il prodotto desiderato.

7.1.1 Reazioni senza solvente

Le reazioni senza solventi sono una soluzione semplice ai problemi legati ai solventi. Sebbene alcune sostanze chimiche su larga scala possano essere prodotte senza l'uso di solventi, per reazioni più complesse diventa spesso necessario utilizzarli. I solventi sono cruciali nelle reazioni esotermiche, poiché agiscono da dissipatori di calore. Anche lo spegnimento dei reagenti in eccesso può essere difficile senza l'uso di un solvente adatto. Il miscelamento efficace senza l'ausilio di solventi può essere complicato, specialmente con l'uso di reagenti solidi. Nonostante ciò, spesso i solventi sono ancora necessari per l'estrazione, la separazione e la purificazione dei prodotti. I processi senza solventi possono essere altamente efficaci, specialmente nel velocizzare le reazioni altrimenti lente e sono quindi una valida alternativa da tenere in considerazione.

7.1.2 Recupero del solvente

Il recupero dei solventi può influenzare positivamente l'impatto ambientale e, di conseguenza, le prestazioni complessive di un processo industriale. Tuttavia, quando il recupero dei solventi non è economicamente vantaggioso, esistono altre opzioni da considerare. Ad esempio, i solventi possono essere riutilizzati in altri processi industriali o possono essere inceneriti per il recupero di calore. Solitamente, i solventi volatili richiedono meno energia per essere recuperati, ma possono comportare perdite ambientali e vapori difficili da condensare. Per esempio, il diclorometano spesso non può essere recuperato oltre il 50-60% a causa

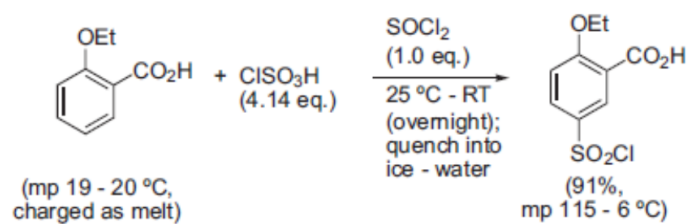


Figura 10: *Clorosolfonazione senza solvente utilizzata in larga scala*

delle perdite durante l'uso e il recupero. Il suo incenerimento richiede un inceneritore resistente agli acidi e un efficiente scrubber acido per trattenere l'HCl. Al contrario, i solventi non volatili, come quelli polari aprotici come DMF, DMSO e DMAc, sono difficili da recuperare a causa del loro elevato consumo energetico. Le miscele di solventi sono più complesse da trattare rispetto ai singoli solventi e richiedono attrezzature dedicate e un controllo più preciso. Le miscele azeotropiche possono rappresentare una soluzione conveniente per il riciclo dei solventi, poiché possono essere trattate come singoli componenti. Inoltre, i solventi che formano azeotropi con l'acqua sono preferiti in quanto possono essere essiccati più facilmente. In generale, si tiene conto l'ECO-I 99 di un solvente e di conseguenza se esso risulta basso è più conveniente bruciarlo, se questo parametro risulta invece alto è più conveniente riciclarlo.

8 Workup, purificazione e impurità

8.1 Work up

Il workup, essenziale nel processo di una reazione chimica, avviene dopo la sua conclusione. Comprende diversi passaggi: il primo è il quench, che spegne la reazione inibendo i reattivi. Segue la rimozione delle impurità e dei co-prodotti, culminando nell'ottenimento del prodotto finale in una forma adatta per la cristallizzazione dei cristalli puri. È cruciale studiare il workup in modo da ridurre al minimo gli step e l'uso di recipienti, ottimizzando le separazioni per ridurre i costi (che costituiscono la maggior parte dei costi di una reazione). La stabilità del prodotto è una considerazione primaria: in impianto, le operazioni richiedono tempi prolungati, esponendo il prodotto al workup per periodi più lunghi. Pertanto, è importante considerare la stabilità del prodotto al pH, alla temperatura e tenere a mente la solubilità dei reagenti, dei prodotti e dei sali. Sfruttare al massimo le separazioni di fase e rimuovere eventuali solidi che possono formarsi, poiché rappresentano una delle principali fonti di problemi. Quando il prodotto o il sottoprodotto vengono isolati tramite filtrazione come solidi, è importante sviluppare le condizioni per la cristallizzazione al fine di controllare le caratteristiche fisiche e chimiche dei solidi. Questo perché i precipitati possono filtrare lentamente, rallentando i tempi di permanenza in impianto del prodotto. In ambito industriale, si evitano le estrazioni liquido-liquido, preferendo la cristallizzazione o la precipitazione del prodotto dalla miscela di reazione per ragioni di produttività. La precipitazione è favorita dall'uso di non solventi, sebbene sia una pratica sconsigliata ma talvolta necessaria. Per l'anidrifazione del prodotto, si ricorre agli azeotropi solvente-acqua, mentre reagenti e co-prodotti volatili possono essere rimossi senza attuare un workup attivo.

8.2 Quenching

L'obiettivo del quenching è quello di neutralizzare i componenti reattivi della reazione, siano essi intermedi, reagenti non reagiti o coprodotti. E' una operazione importante e può configurarsi come parte più pericolosa della reazione. Esistono due tipi di quenching: diretto o inverso. Questi due metodi sono entrambi validi e devono possono essere considerati entrambi, tenendo a mente che il direct richiede un solo contenitore mentre il reverse almeno due.

Direct Quench

Consiste nell'inserire all'interno del reattore la miscela di quench per disattivare i reagenti. Queste miscele vanno aggiunti in largo eccesso per assicurarsi che la reazione sia spenta completamente ed è importante sapere se il prodotto una volta spento produce un sottoprodotto pericoloso ed è sempre importante considerare ciò che si forma durante il workup. Il coprodotto più comune che si forma durante la fase di quenching è H_2 , che essendo esplosivo è un gas pericoloso e va quindi maneggiato con cautela. Ogni reazione ha la sua soluzione di quench preferita, ad esempio per le reazioni di riduzione si può usare acqua o metanolo (se ci troviamo a basse T dove l'acqua non può essere impiegata) oppure gli organolitii possono essere spenti con acetone, alcoli o acidi carbossilici. Se siamo invece in presenza di sali di alluminio è possibile usare i sali di rochelle per renderli solubili in acqua. In molti casi, il coprodotto della reazione si può rimuovere per filtrazione, rendendo più semplice il processo di quenching.

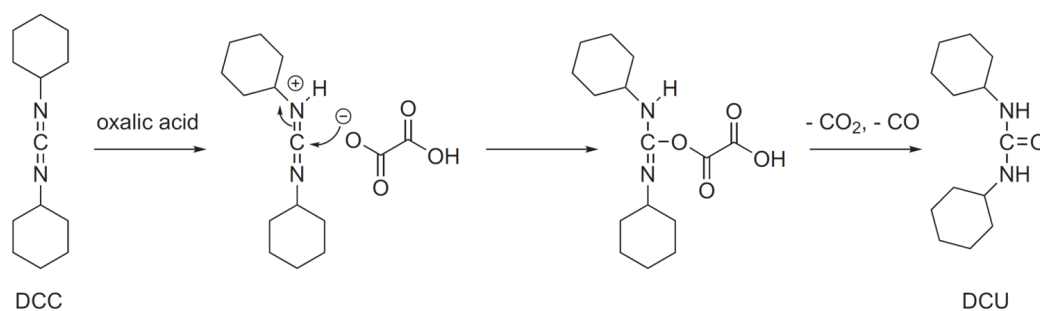


Figura 11: Utilizzo di acido ossalico solido per neutralizzare l'eccesso di dicicloesilcarbodiimmide (DCC). Dopo che i sottoprodotti come l'urea dicicloesilica (DCU) sono rimossi, il prodotto può essere cristallizzato e isolato

Per reagenti molto reattivi si deve procedere a step in modo tale da evitare reazioni eccessivamente violente, ad esempio $LiAlH_4$ va spento prima con acetone poi acqua (se si deve usare solo acqua, farlo molto lentamente e agitando in maniera vigorosa per disperdere la soluzione di quench. per reazioni molto pericolose (spegnimento borano) la si equipara ad una reazione e la si considera in toto, con i suoi sottoprodotti.

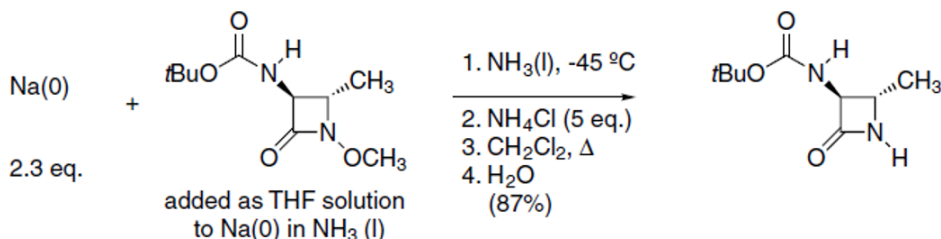


Figura 12: L'utilizzo diretto di acqua comporta una reazione altamente esotermica di conseguenza è meglio è meglio utilizzare ammoniaca ammonio cloruro e successivamente acqua per spegnere le riduzioni con metalli in ammoniaca

Reverse quench

aggiungere la reazione alla soluzione di quench. spesso questo tipo di quench permette di avere meno sottoprodotti (o nessun sottoprodotto) rispetto ai quench diretti. è bene notare che spesso il reverse quench non è sempre possibile. Consiste nell'inserire la soluzione prodotto ad un reattore contenente la soluzione quench. Spesso questo tipo di quench permette di avere meno coprodotti e sottoprodotti rispetto al direct quench ma non è una tecnica non sempre utilizzabile o conveniente, ad esempio se la miscela di quench è volatile bisogna avere un sistema per contenerne i fumi.

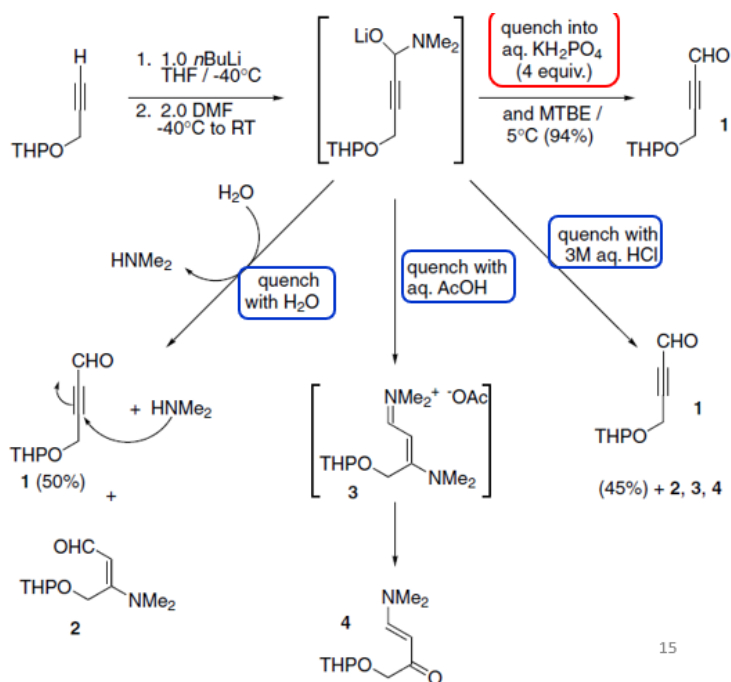


Figura 13: L'utilizzo di un tecnica reverse quench permette l'ottenimento di un prodotto puro senza coprodotti e sottoprodotti a differenza di quanto osservato con l'inserimento di soluzioni di quench di acqua, acido acetico e acido cloridrico

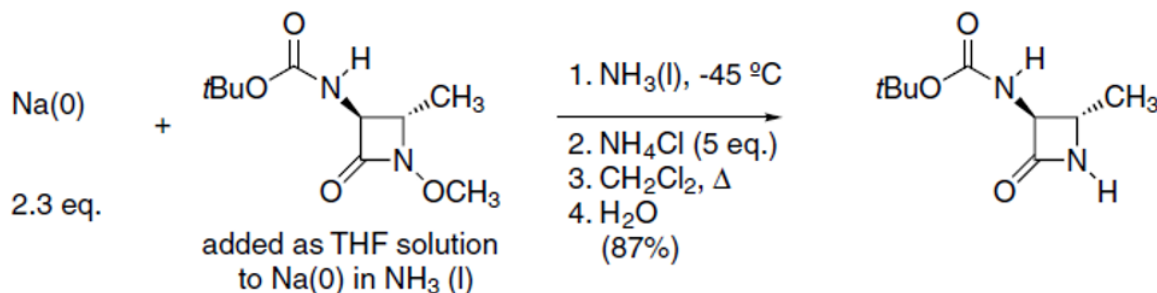


Figura 14: L'utilizzo di un reverse quench in questo caso risulta impratico in quanto richiede una dotazione in grado di contenere i fumi di ammoniaca durante il trasferimento da un contenitore all'altro

8.3 Control

le impurezze devono essere controllate soprattutto in ambito farmaceutico. si considerano le impurezze che si possono trovare. bisogna controllare le reazioni non selettive (schema regio e stereo) e reazioni parassite la stabilità generale quindi al calore, umidità, all'ossigeno, viscosità, stabilità cristallina il numero ed efficienza dei punti di purificazione robustezza della sintesi (resistenza a cambiamenti di solventi)

8.4 Stabilità degli intermedi e dei prodotti in fase finale

tenere in considerazione la stabilità chimica e fisica degli intermedi. per la formulazione bisogna controllare le proprietà del cristallo (polimorfo, dimensioni, igroscopia, forma) composti cristallini sono più stabili di composti più stabili dei composti amorfi. proprietà importanti per i solidi sono fotostabili, termostabili, poco igroscopiche, punto di fusione (se inferiore a 60°C è un problema perché durante la compressione della pasticca (es) le temperature si alzano). le forme dei sali di molecole organiche sono considerate proprietà intellettuale e quindi sono brevettabili.

8.4.1 impurezze

dal punto di vista della sintesi si fa una valutazione del rischio, gli esperti della sintesi analizzano tutti gli step di sintesi del principio attivo per capire se c'è una possibilità di presenza di agenti tossici di vario tipo che possono essere generati. good practices dice che dobbiamo evitare di usare agenti tossici durante la sintesi ma questo spesso non è fattibile quindi in genere si usano composti tossici all'inizio della sintesi così da cercare di eliminarli durante la purificazione e tutti gli assaggi successivi. le impurezze devono essere analizzate come rischi. il problema dell'analisi su queste quantità è l'accuratezza dell'analisi dato che parliamo di ppm.

8.4.2 control

purification point. se non emetto purificazioni nelle sintesi multistadio rischio di avere un sacco di impurezze. bisogna avere dei purification points ovvero punti in cui tolgo le impurezze. un'altra strategia che viene spesso usata è quella di bloccare l'ultimo stadio della sintesi ovvero controllare il penultimo ovvero l'immediato precursore del prodotto finale: si cerca di controllare al massimo la qualità del penultimo così da avere certezze sulla qualità del prodotto finale.

quality by design invece di fare quality by testing (fai il prodotto e controlli se ci sono le impurezze) si fa il quality by design cioè ragionare a monte qual è il punto in cui si formano le impurezze drug master file che si manda alle autorità dove c'è scritto parametri e risultati insieme ai registered starting materials ovvero i composti iniziali di sintesi. il processo deve poi essere validato

8.4.3 design of experiment

si usa per vedere la relazione tra cambiare le variabili e l'output ottenuto.